

THÈSE

DE DOCTEUR - INGENIEUR : PHYSIQUE

PRESENTEE

A LA FACULTE DES SCIENCES
DE PARIS

par

M. Akbar DJABARNEJAD

pour obtenir

LE TITRE DE DOCTEUR - INGENIEUR

Sujet de la Thèse : MISE AU POINT D'UNE METHODE D'ESSAI DE DEMARRAGE DES
MOTEURS AUX BASSES TEMPERATURES (combustion aux basses
températures dans les moteurs alternatifs).

Soutenue le 20 Juin 1970, devant la Commission d'Examen

MM. H. PONCIN,

Président

R. SIESTRUNCK,
R. VICHNIEVSKY,
J. ACHART,

} *Examineurs*

R. BLAIS

Invité

THÈSE

DE DOCTEUR - INGENIEUR : PHYSIQUE

PRESENTEE

A LA FACULTE DES SCIENCES
DE PARIS

par

M. Akbar DJABARNEJAD

pour obtenir

LE TITRE DE DOCTEUR - INGENIEUR

Sujet de la Thèse : MISE AU POINT D'UNE METHODE D'ESSAI DE DEMARRAGE DES
MOTEURS AUX BASSES TEMPERATURES (combustion aux basses
températures dans les moteurs alternatifs).

Soutenue le 20 Juin 1970, devant la Commission d'Examen

MM. H. PONCIN,

Président

R. SIESTRUNCK,
R. VICHNIEVSKY,
J. ACHART,

}

Examineurs

R. BLAIS

Invité

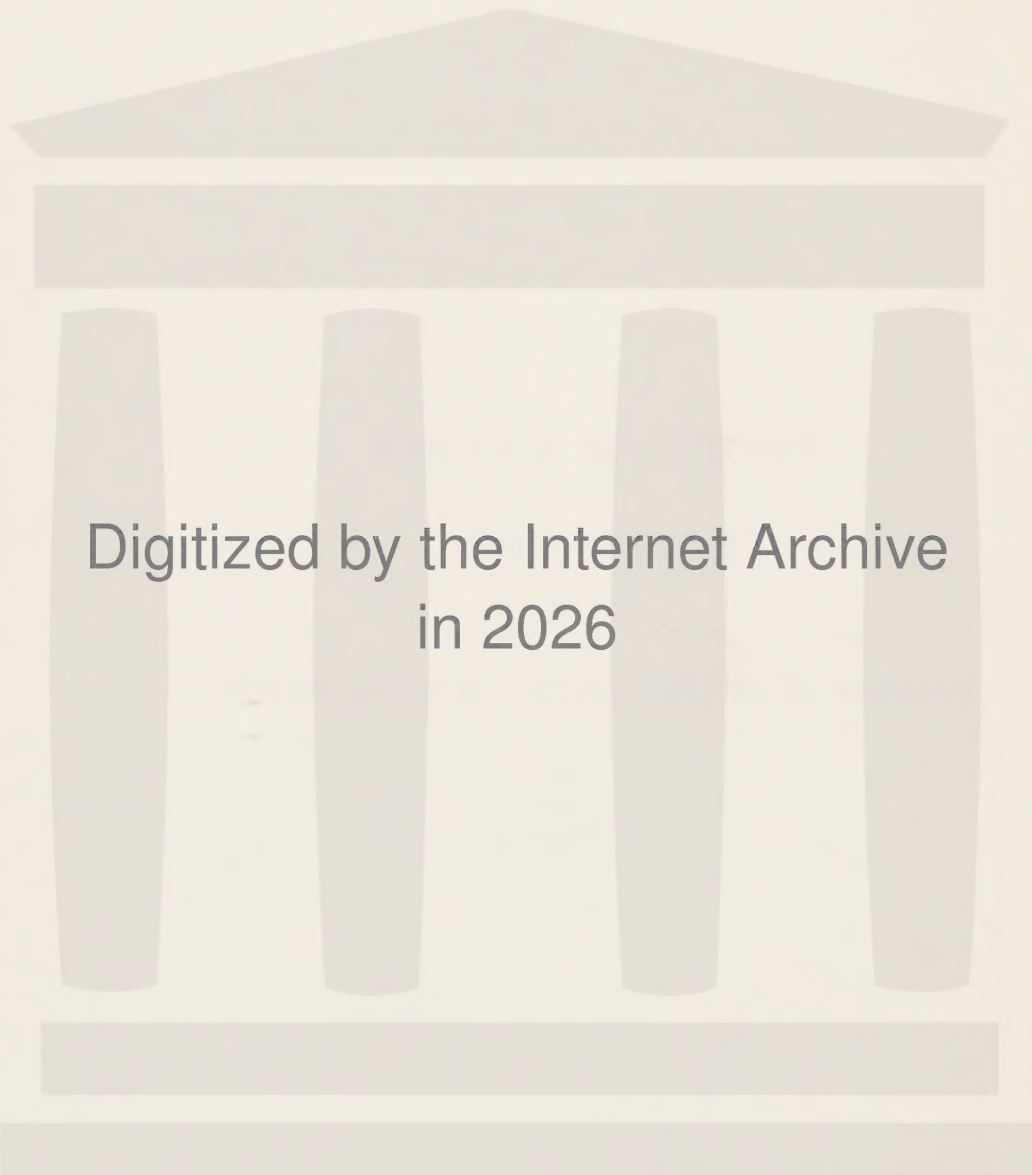


A

MONSIEUR LE PROFESSEUR

R. VICHNIEVSKY

HOMMAGE DE RESPECTUEUSE RECONNAISSANCE



Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41549922_0057

REMERCIEMENTS

Ce travail a été effectué au Centre National d'Etudes et d'Expérimentation de Machinisme Agricole, en relation avec le Laboratoire de Mécanique Physique et Expérimentale de la Faculté des Sciences de Paris à Saint-Cyr, sous la Direction de Monsieur le Professeur R. VICHNIEVSKY que je remercie très respectueusement pour ses conseils précieux.

Je tiens à exprimer ma gratitude à la Direction et au Personnel du C.N.E.E.M.A. pour leur accueil.

Je tiens à exprimer à Monsieur ACHART, Ingénieur en Chef du Génie Rural des Eaux et des Forêts, Chef du Service des Essais, l'expression de ma reconnaissance et de ma profonde gratitude pour avoir mis en oeuvre toute sa possibilité, pour que ce travail puisse se réaliser dans les meilleures conditions.

Je prie Monsieur BLAIS, Directeur de l'Institut National Agronomique, de bien vouloir trouver ici, l'expression de mes sincères remerciements, c'est grâce à son aide et à son appui, que j'ai pu entreprendre ma deuxième étude en France.

Je tiens à remercier Monsieur le Professeur PONCIN et Monsieur le Professeur SIESTRUNCK qui ont bien voulu accepter de faire partie de la Commission d'Examen de cette thèse.

Je remercie également les autorités des gouvernements français et iranien pour leur aide qui a rendu possible la prolongation de mon séjour en France.

A

LA MEMOIRE DE MA MERE

A MON PERE

A MA FEMME

S O M M A I R E

A.- ENONCE DU PROBLEME

I.- Introduction 1

B.- LE POINT DU DEVELOPPEMENT ACTUEL DU PROBLEME DE DEMARRAGE DES MOTEURS DIESEL AUX BASSES TEMPERATURES 2

I.- Les paramètres et phénomènes fondamentaux 2

1.- Inflammation 2

2.- La réaction d'oxydation 3

3.- La vitesse de réaction 3

1.- *Effet de la température sur la vitesse de réaction* 4

4.- La flamme froide 5

5.- Délai d'inflammation 6

6.- Procédés de l'injection et pulvérisation 7

II.- Moteur 8

1.- Dessin de la chambre de combustion 8

2.- La turbulence 9

3.- Le taux de compression 9

4.- Suralimentation 10

5.- Etanchéité du cylindre 11

6.- Vitesse de rotation 11

III.- Carburant 13

1.- Additifs oxydants 13

2.- Fluide de démarrage 14

IV.- Les accessoires facilitant le démarrage 15

1.- Réchauffage de l'air d'admission 15

2.- Réchauffage de l'huile de graissage 16

3.- Réchauffage du carburant	16
4.- Réchauffage du moteur	16
5.- Démarreur	16
6.- Batterie	17
7.- Huile de graissage	17

V.- Mesure de température dans les moteurs 19

1.- Technique de mesure des températures instantanée du fluide moteur	19
1.- <i>Pyrométrie optique</i>	19
2.- <i>Emploi des thermomètres à résistance</i>	19
2.- Technique de la mesure de la température de la surface en contact avec les gaz	24
3.- Détermination de la température à partir des diagrammes de pression	25

C.- MISE AU POINT DES MATERIELS ET DES METHODES EN VUE D'ETUDE DU PROBLEME 28

1.- Mise au point des matériels d'expérimentation 28

1.- Montage mécanique	29
2.- Montage électrique	29
3.- Moyens choisis pour capter les phénomènes	33
1.- <i>Capteur de pression</i>	33
2.- <i>Capteurs de températures</i>	33
1.- Perçage de la culasse	43
2.- Etalonnage des capteurs	43
3.- Montage en pont Wheatstone du thermomètre à résistance	43
3.- <i>Marquage des signaux correspondants aux angles de rotation</i>	44
4.- Contrôle de déroulement des opérations dans la chambre froide	44
5.- Enregistrement	44
6.- Amplification	45

II.- Exécution des expériences 45

1.- Le moteur diesel entraîné par le démarreur	46
1.- <i>Méthode de l'expérience</i>	46
2.- Moteur diesel entraîné au moyen du montage avec le moteur électrique	47

1.- Méthode de l'expérience	49
2.- Caractéristiques des combustibles utilisés	49
D.- LES RESULTATS DES EXPERIENCES	54
I.- Les anomalies rencontrées au cours des expériences	54
1.- La déformation de la courbe de pression due au cap- teur de pression	54
1.- Démonstration de la décharge et imprécisions en position dynamique du piezo-amplificateur pour les basses vitesses	54
2.- Ressemblance de la courbe déformée de pression avec la courbe dérivée 1ère de pression	56
2.- Déformation de la courbe de pression due au montage mécanique	58
3.- Déphasage des courbes de pression et de température par rapport au PMH mécanique	58
1.- Interprétations	60
4.- Les parasites électromagnétiques	61
II.- Résultats des expériences avec le démarreur	62
1.- Variation de la vitesse d'entraînement du démarreur en fonction du temps pour des températures différen- tes	62
2.- Variation de la pression en fonction de la température	62
3.- Variation du temps de démarrage	62
4.- Variation du couple résistant en fonction de la tempé- rature	62
III.- Résultats des expériences avec le moteur diesel entraî- né par le montage électrique	72
1.- Variation de la vitesse en fonction du temps pour chaque température	72
2.- Variation de la température en fonction du temps d'entraînement	72
3.- Variation de la pression maximale avec la vitesse d'entraînement	75
4.- Variation du temps d'entraînement nécessaire pour l'ap- parition de la flamme en fonction de l'abaissement de température pour chaque vitesse	75
5.- L'évolution de la température de l'huile et de la pa- roi	76

E.- PRECISION DE MESURE ET INTERPRETATION	93
I.- Précision de la mesure	93
1.- Sensibilité d'enregistrement de la température	93
2.- Calcul de la sensibilité pour les deux montages envisagés	94
3.- Précision de la mesure de température	94
4.- Précision de la mesure de pression	95
5.- Démonstrations théoriques de la diminution de l'irrégularité de la rotation en fonction de la vitesse de rotation	95
6.- Calcul des valeurs réelles de la température et de la pression	97
7.- Calcul de la variation du volume du cylindre en fonction des angles de rotation	97
8.- Calcul du taux de compression en fonction des angles de rotation	98
9.- Calcul du coefficient polytropique	98
10.- Calcul du cycle de température	99
II.- Interprétation des résultats de calcul	99
F.- CONCLUSIONS	101
Tableaux	103
Bibliographie	112

A.- ENONCE DU PROBLEME

I.- INTRODUCTION

L'utilisation des moteurs thermiques dans l'agriculture est caractérisée par leur fonctionnement essentiellement intermittent et cela dans des conditions ambiantes qui varient dans de larges limites.

L'amélioration de l'exploitation des moteurs dans ces conditions ne peut résulter que d'une étude systématique des paramètres qui agissent plus ou moins directement sur l'inflammation du mélange et sur la poursuite de la combustion stable en régimes variables.

Malgré les énormes progrès réalisés dans le domaine des sciences et des techniques, la théorie de la combustion est loin d'être parfaitement établie ; A.N. VOINOV l'a définie comme une réaction chimique à évolution rapide, accompagnée d'une émission lumineuse et d'un important dégagement de chaleur.

L'étude de la combustion dans les moteurs est compliquée ; en effet, les relations entre les divers phénomènes n'ont pas encore trouvées alors que le nombre des variables à mesurer est grand ; l'étude de ces phénomènes doit être effectuée au sein du moteur et dans les conditions réelles d'utilisation, ce qui est peu commode, car d'une part les variables ainsi qu'il a été dit plus haut sont nombreuses, mais d'autre part elles ne se prêtent pas facilement à l'observation ; les considérations et les suppositions théoriques sont souvent très loin de la réalité ; l'expérience peut s'en approcher, à condition que les appareils ne perturbent pas le phénomène et aient une précision suffisante.

Aujourd'hui on trouve des appareils satisfaisants pour la mesure de certains paramètres comme : la pression, la vitesse de rotation, le délai d'inflammation, ..., mais la mesure de quelques autres comme : la température des gaz et des parois du moteur, n'est pas encore définitivement résolue.

Pour l'étude du démarrage à froid, la mesure de température s'avère indispensable, mais là des difficultés sont considérables. D'abord, le choix de la sonde pose des problèmes ; elle doit en effet satisfaire deux conditions contradictoires : avoir une bonne résistance mécanique et un temps de réponse négligeable, d'autre part les mesures sont perturbées par les parasites produits par les engins électriques, surtout les démarreurs.

B.- LE POINT DU DEVELOPPEMENT ACTUEL DU PROBLEME DE DEMARRAGE DES MOTEURS DIESEL AUX BASSES TEMPERATURES.

Dans cette partie d'étude bibliographique, nous avons fait le point de la situation actuelle en citant les résultats et les points de vue des différents auteurs.

I.- LES PARAMETRES ET LES PHENOMENES FONDAMENTAUX

Dans ce chapitre nous parlerons des paramètres et des phénomènes fondamentaux, intervenant dans le départ à froid et dans le fonctionnement des moteurs diesel, comme l'inflammation, la vitesse de réaction, la flamme froide, le délai d'inflammation, l'injection, la vitesse de rotation et la mesure de température.

1.1.- INFLAMMATION

Aux basses températures, les molécules du mélange ne sont pas actives, la réaction est ralentie, la vitesse de réaction tend vers zéro, l'apport de l'énergie d'une source extérieure est indispensable pour l'élévation de température, par un phénomène physique. L'inflammation présente (2) un échauffement local intense d'une faible fraction du mélange combustible. Il n'y aura pas inflammation tant que la température ne dépassera pas une certaine valeur critique, où commence un auto-réchauffage du mélange qui s'achève par l'inflammation. Les limites d'inflammation du mélange dépendent (7) de la température de compression et de la richesse. L'inflammation commence (9) dans la trace de vapeur. HOLDER croit (61) qu'une certaine vaporisation, bien que très limitée est un préliminaire nécessaire à l'inflammation, TAUSZ pense que les phénomènes précédant l'inflammation suggèrent que l'oxygène de l'air se combine avec le combustible pour former des peroxydes. Ceux-ci étant instables, ils ne peuvent exister dans les conditions de haute pression et de température élevée, ils sont ensuite décomposés et l'inflammation est amorcée. BOERLAGE et BROEZE ont énoncé qu'un cracking des particules et combustible est essentiel pour l'amorçage de la combustion. La vaporisation et la décomposition sont toutes deux nécessaires avant que l'inflammation se produise. Dans le cas des gouttes de gas-oil la flamme se produit à une température de 100°C à la valeur critique. La flamme se produit d'abord dans le sillage de la goutte et à une distance du centre de la gouttelette égale à au moins deux fois le diamètre.

1.2.- LA REACTION D'OXYDATION

L'accumulation du carburant (52) peut donner lieu à une lente oxydation, et aussi à des produits intermédiaires actifs de la réaction, lesquels à leur tour accélèrent l'inflammation. Il existe deux théories (35), l'une attribue un rôle important aux aldéhydes, l'autre aux peroxydes. La formation des peroxydes (31) aux dépens des hydrocarbures aux faibles températures, conduit à des produits instables, à décomposition exothermique. Les peroxydes sont notamment présents lorsque le moteur est alimenté en hydrocarbures paraffiniques facilement inflammables, et absents lors de l'utilisation du benzène qui est un hydrocarbure difficile à enflammer. L'addition de certains peroxydes au combustible réduit le délai d'inflammation. Le rôle joué par les peroxydes sur l'inflammation dans un moteur diesel est également montré par les divers procédés de double injection (procédé VIGOM). Les analyses faites (32) pendant les délais d'auto-inflammation ont mis en évidence un accroissement de la concentration de formaldéhyde. Cette concentration de formaldéhyde exerce un effet de promoteur prononcé sur la vitesse de réaction. L'auto-accélération des réactions préflamme (2) peut avoir pour origine la ramification des chaînes.

1.3.- LA VITESSE DE REACTION

La réaction est considérée (63) comme produite par une élévation de température préalable, due au phénomène purement physique de compression adiabatique du milieu. L'augmentation de la température se présente (2) comme le facteur déterminant d'accélération des réactions. Le facteur cinétique a un effet (5) prépondérant dans le domaine des températures basses. La turbulence augmente (38) la vitesse de propagation. La vitesse d'une réaction chimique est déterminée par la variation dans le temps de la concentration :

$$v = \frac{dc}{dt}$$

Les concentrations absolues sont proportionnelles à la pression totale initiale du mélange. Ainsi la vitesse absolue de réaction, pour une réaction d'ordre n en fonction de la pression est déterminée par :

$$v_{ab} = \frac{dc}{dt} = K P_o^n$$

Dans un domaine d'inflammation normale à haute température (35) la relation entre la période d'induction τ des flammes, de la

réaction lente et les paramètres, pression, température est d'après SEMENOFF :

$$\tau P^n e^{-\frac{E}{RT}} = Cte$$

n = ordre de réaction

E = Energie d'activation

Aux basses températures, dans le domaine des flammes froides, l'utilisation de cette loi est assez délicate. AIVAZOV et NEUMANN ont présenté la formule suivante :

$$\tau (P - P_0)^n e^{-\frac{E}{RT}} = f(C) = Cte$$

P_0 étant la limite du domaine de la flamme froide variable avec la température.

Les énergies d'activation sont toujours voisines de 40 ± 3 kcal. La réaction lente se transforme en flamme à partir d'une certaine température. Il y a, pendant la période d'induction, accumulation de composés oxygénés critiques qui explosent à partir d'une certaine concentration. La flamme normale de deuxième stade naît dans les mélanges perturbés par l'accumulation des produits de la flamme froide et de la réaction lente.

1.3.1.- Effet de la température sur la vitesse de réaction

La vitesse des réactions chimiques augmente notablement avec l'accroissement de la température (2). La constante K de la vitesse de réaction varie avec la température suivant la loi d'ARRHENIUS :

$$K = \text{cont} \times e^{-\frac{E}{RT}}$$

avec E énergie d'activation, constant pour le système réagissant donné. Les molécules prennent part à la réaction seulement dans le cas, où l'énergie cinétique de chacune dépasse une certaine valeur E nécessaire pour la rupture.

Comme l'énergie de rupture des liaisons intramoléculaires est très importante, la réaction est seulement possible lors du choc des molécules très "actives". Pour les molécules diatomiques O_2 et H_2 l'énergie de rupture dépasse 100 kcal/mol. Pour les molécules des

hydrocarbures elle oscille dans les limites 60-100. Avec l'accroissement de température, la fraction des molécules actives à énergie supérieure à E augmente très rapidement, ce qui conduit à une accélération très rapide de la réaction. La vitesse de réaction dépend d'autant plus de la température que l'énergie d'activation est plus grande et que la température est plus basse. Par exemple, avec $E = 40 \text{ Kcal/mol}$ et à la température de 500°K l'augmentation de cette dernière de 50°C entraîne à la multiplication par 7 de la vitesse de réaction tandis qu'à la température de 1000°K la vitesse se trouve multipliée par 2,8. Avec la valeur $E = 20 \text{ kcal/mol}$ le même accroissement de température de 500 à 550°K et de 1000 à 1050°K entraîne la multiplication de la vitesse respectivement par 7,9 et par 1,6. La vitesse de réaction reste très petite jusqu'à une certaine valeur de la température, d'autant plus élevée que la valeur de E est plus grande. Les vitesses de réaction (5) sont plus importantes pour les mélanges enrichis, malgré que les températures de combustion correspondante soient plus basses.

1.4.- LA FLAMME FROIDE

Dans une certaine zone de température, l'inflammation est précédée par l'apparition de la flamme froide (2). A partir des températures de compression de $350-400^\circ\text{C}$ sur les diagrammes de pression apparaissent des paliers dus à la flamme froide (34). Les mélanges d'hydrocarbures paraffinique/air, ont un domaine de flammes froides correspondant à des températures de l'ordre de $280-290^\circ\text{C}$. Ces réactions donnent lieu à des dégagements de chaleur relativement importants. Selon la théorie de Frank KAMENETSKY (35), la flamme est déclenchée quand la concentration en peroxyde atteint une valeur critique. La décomposition de ces peroxydes produit des aldéhydes. Le peroxyde se forme et se détruit dans la réaction lente : quand la concentration critique est atteinte il y a explosion. Toutes les réactions constituant les schémas réactionnels de l'oxydation en phase gazeuse des hydrocarbures saturés sont radicalaires. BLANCHARD considère la flamme froide comme une sorte de soupape évacuant le surplus des peroxydes.

Les composés hydrocarbonés à chaîne linéaire saturée ou non saturée, subissent dans l'oxydation, entre 200 et 500°C deux inflammations dont la morphologie est assez compliquée. Si, dans un réacteur chauffé à une température convenable, on introduit un mélange gazeux composé par exemple d'un hydrocarbure et d'oxygène, une réaction chimique prend naissance, on la présente sous la forme :



Elle se fait par étape successives avec une accumulation plus ou moins grande de composés intermédiaires, aldéhydes, peroxydes, oxyde de carbone, eau oxygénée, etc ...

La flamme froide est produite par des composés intermédiaires. La flamme froide accompagne presque toujours la combustion des composés organiques à chaîne paraffinique et éthylénique. Les flammes froides ont été découvertes par PERKINS. Il y a plusieurs limites pour l'apparition des flammes froides, les aldéhydes 200°C, les alcools 300°C, les éthers-oxydes 220-160°C, les cétones 320°C, les amines 380°C. Les réactions lentes commencent à se manifester pour les hydrocarbures vers 150°C et se développent d'une manière continue jusqu'à la limite basse température des flammes froides entre 270 et 350°C. La flamme froide est considérée comme une transformation de la réaction lente.

1.5.- DELAI D'INFLAMMATION

On définit le délai d'inflammation comme le temps s'écoulant entre la levée de l'aiguille de l'injecteur et la montée de pression. Ce délai est composé du délai physique et du délai chimique. Plusieurs auteurs sont unanimes à affirmer que le délai d'inflammation suit une loi exponentielle en fonction de température, et il est inversement proportionnel à la pression :

$$\tau = \frac{a}{p^m} e^{\frac{b}{T}} \quad (48)$$

VOINOV définit ce délai, l'intervalle de temps entre le début du développement des réactions préflamme et l'instant d'inflammation (2). Pour le processus à deux phases, la durée totale du délai se décompose en deux parties, délai de la flamme froide τ_1 et de l'intervalle de temps entre l'apparition de la flamme froide et l'inflammation chaude τ_2 . Les durées des délais de la flamme froide τ_1 en fonction de la température de compression dans les limites de 300-500°C obéissent assez bien à la loi :

$$\tau_1 = A P^{-m} e^{\frac{E}{RT}}$$

Pour les différents combustibles, les valeurs de E oscillent entre 22 et 35 kcal/mol et la valeur de m entre 0 et 0,5, c'est-à-dire que la durée diminue fortement avec l'accroissement de la température et dépend relativement peu de la pression. Ce dernier fait indique que les réactions dans la première phase du processus préflamme se rapprochent des réactions monomoléculaires. Aux basses températures le processus d'inflammation a un critère à phase unique $\tau_2 = 0$.

Les délais d'inflammation dans les moteurs à allumage par compression peuvent être réduit à 0,5 m sec (5) ce qui représente 15 degrés de rotation à 6000 tr/mn vitesse jamais atteinte dans ce

type de moteur. Le délai diminue (6) lorsque le taux de compression, la température de l'air et la charge augmentent. La finesse des gouttelettes réduit le délai. La turbulence réduit le délai d'inflammation. On constate que le délai passe par un minimum (40) pour une richesse voisine de 1. L'effet du plomb tétraéthyle est d'allonger le délai, alors que le nitrate d'éthyle diminue ce délai.

Pour un taux de compression donné, le délai d'inflammation est inversement proportionnel à la pression (48) et toute augmentation de la pression de suralimentation dans le domaine des charges faibles entraîne une diminution notable du délai d'inflammation. L'augmentation du taux de compression influe sur le délai du côté des faibles charges. Un accroissement de régime a pour effet une diminution exprimée en temps du délai d'inflammation.

1.6.- PROCEDES DE L'INJECTION ET PULVERISATION

Bien que l'oxydation des hydrocarbures en phase liquide commence aux températures plus basses qu'en phase gazeuse (2), l'inflammation du combustible liquide pulvérisé a lieu seulement après son évaporation, donc la finesse des gouttelettes pulvérisées peut accélérer l'évaporation. En augmentant la pression du gaz de 1 à 16 kg/cm² on augmente la densité du gaz (12), ce qui occasionne une diminution de la vitesse du jet d'environ 15 %. Il se produit sous l'influence du courant de gaz un important changement dans la structure et les paramètres géométriques du jet, le contour extérieur du jet est entraîné à une vitesse voisine de celle du courant, on observe une vitesse voisine de celle du courant, on observe une diminution de la progression du sommet du contour du jet.

L'augmentation de la pression du ressort de l'injecteur augmente la vitesse de déplacement du jet de carburant (21) et la finesse de pulvérisation, ce qui influence favorablement le démarrage, mais la pression plus élevée du ressort de l'injecteur augmente la portée du jet de carburant et de ce fait davantage de carburant est projeté sur les parois de la chambre de combustion, ce qui est défavorable pour le démarrage. Pour les jets homogènes constitués par des gouttes de diamètre relativement uniforme et inférieur à environ 10 microns, le brouillard se comporte (39), comme un mélange gazeux homogène et les limites d'inflammation restent sensiblement les mêmes. L'enrichissement du mélange facilite l'auto-inflammation (2). On obtient un démarrage plus facile des moteurs diesel par l'injection d'une quantité plus élevée de carburant dans le cylindre (21). La durée la plus courte du démarrage fut obtenue avec un angle d'avance de l'injection de 16-18° avant le P.M.H. A l'aide de l'injecteur électronique (45), on fait varier la quantité de combustible introduit, sous pression constante, en modifiant le temps d'injection pour un débit injecté bien déterminé, le temps d'introduction étant constant, l'angle d'injection variera proportionnellement à la vitesse de rotation du moteur. Une diminution de l'avance à l'injection entraîne (48), simplement un accroissement de la durée de la première phase de combustion. En injectant une partie de carburant dans le gaz résiduel on amorce la réaction (procédé VIGOR).

II.- MOTEUR

La qualité de démarrage et le fonctionnement d'un moteur dépendent de la conception de ses éléments fondamentaux, par exemple, le dessin de la chambre de combustion, le taux de compression, la suralimentation, la turbulence, la vitesse de rotation, etc ...

2.1.- DESSIN DE LA CHAMBRE DE COMBUSTION

On peut citer trois classifications essentielles (61) des chambres de combustion :

- 1.- Celle dans laquelle le combustible est injecté directement dans l'espace où il brûle.
- 2.- Celle dans laquelle on a prévu une antichambre dans laquelle la totalité du combustible est injectée, mais où une partie seulement du combustible est brûlée, la combustion du combustible restant étant achevée dans la chambre principale.
- 3.- Celle dans laquelle on a prévu une chambre auxiliaire, l'injection ayant toutefois lieu dans la chambre principale. Le démarrage était difficile (64) avec les moteurs munis d'une chambre de précombustion. Les chambres de combustion séparées et de précombustion présentent une consommation élevée et des difficultés pour le démarrage par rapport aux chambres de combustion avec injection directe (25). Les chambres de combustion avec injection directe possèdent un cycle de combustion brusque et une pression maximale très élevée. Les chambres hémisphériques à allumage au centre répondent à l'exigence des parcours réduits de flamme (5).

Une chambre de combustion hémisphérique permet (41) l'emploi de taux légèrement plus élevés que les formes de chambres dites "*en baignoire*". Dans le procédé MAN par I.S. MEURER, (7) la chambre de combustion sphérique est située au milieu du piston et fournit en deux jets tangentiels vers la paroi de la chambre de combustion. Après son entrée dans le cylindre l'air admis pour la combustion est en rotation exactement dans la direction du jet de fuel. L'injection du fuel sur la paroi de la chambre de combustion provoque une évaporation proportionnelle au temps. La vapeur du fuel formée sur la surface du film du fuel sera entraînée par l'air rapidement et laminée. Les avantages sont : une combustion égale à chaque fois ; une marche douce du moteur ; peu de bruit et de suie. L'inconvénient : le démarrage rapide à froid n'est pas possible (25). Le procédé MAN applique le principe de formation du mélange "*pelliculaire*". Il existe aussi le principe de formation du mélange "*volumique*" et combinaison de deux principes.

L'Institut Central de Recherches sur les moteurs diesel d'U.R.S.S. (ZNIDI) a mis au point une chambre de combustion à formation de mélange "*volumique-pelliculaire*" qui donne de bons indices de performance. Lorsque le piston s'approche de P.M.H. dans la chambre se créent des courants provoqués par le déplacement de l'air se trouvant au-dessus du piston. Ce déplacement d'air provoque des tourbillons circulaires. La vitesse d'augmentation de la pression de combustion $\frac{dp}{dt}$ et la pression maximale du cycle, les plus grandes se produisent dans les chambres à formation de mélange volumique "*DAIMLER-BENZ*". La chambre de combustion du type ZNIDI se caractérise par une plus faible pression de combustion (62-70 kg/cm²) et un plus faible taux d'augmentation de pression (50). Les chambres de combustion du type ZNIDI sont plus économiques et permettent la polycarburation. Ce type de chambre diminue la dureté de fonctionnement, mais il influence défavorablement sur le démarrage du moteur froid. La transition vers l'injection directe du carburant assure une économie de carburant, des meilleures qualités pour le démarrage et une moindre tension thermique de la culasse tout en assurant une haute fiabilité du moteur et la stabilité de son processus de fonctionnement et un bon démarrage. L'utilisation de la chambre de combustion sur le piston (26) a diminué la consommation en augmentant la puissance du moteur ; il donne une économie de 15 % et une augmentation de puissance de 10-12 %.

2.2.- LA TURBULENCE

Pour la conception rationnelle d'un moteur la turbulence du mélange à l'intérieur du cylindre est un principe fondamental. La vitesse de propagation de la flamme et la vitesse de combustion massive (2) augmente beaucoup lorsque le mélange se trouve soumis à un mouvement tourbillonnaire.

L'augmentation de la turbulence peut conduire (5) à la combustion plus rapide de grosses gouttes que de petites gouttes. La vitesse de rotation augmente la turbulence. Mais celle-ci peut être accrue grâce au dessin spécial de la chambre de combustion. L'inconvénient de la turbulence est la perte de rendement (10) volumétrique et l'augmentation de la perte de chaleur.

2.3.- LE TAUX DE COMPRESSION

L'augmentation du taux de compression augmente la température de compression et facilite le démarrage. Un taux de compression élevé provoque une marche dure pour le moteur et peut causer des anomalies quand le moteur chauffe. Un taux de compression variable peut résoudre le problème.

H. RICARDO (48) a montré que le déplacement du maximum de pression a lieu, effectivement, vers le P.M.H. lorsque le taux de compression augmente. La durée totale de combustion est une fonction exponentielle de l'inverse du rapport de compression volumique. Le taux de compression est un facteur qui manifeste son effet, particulièrement sur la phase initiale du processus de combustion. Le moteur CONTINENTAL utilise des pistons à régulation automatique du taux de compression (22). Si pendant le travail du moteur le taux de compression est égal à 15, pendant le démarrage il sera porté à 21. Ceci a permis de baisser la température limite du démarrage à froid de $- 8^{\circ}\text{C}$ à $- 32^{\circ}\text{C}$. L'augmentation du taux de compression est utile jusqu'à une certaine limite. L'augmentation du taux de compression entraîne l'accroissement des fuites de la charge d'air, et la diminution du régime de rotation favorise ces pertes. Les pertes dues aux fuites durant le parcours des derniers 60° sont égales à 70 %. L'élévation du taux de compression (33); donne l'élévation du niveau de température et de pression, raccourcit le délai d'allumage, mais augmente la fatigue mécanique. La chambre automatique à pression constante de fonctionnement HISPANO-SUIZA est une chambre à taux de compression variable et la société SIGMA a obtenu des meilleurs résultats avec un taux de compression de fonctionnement égal à 14. Le piston BICERI (42) a donné un rapport de compression variable avec une P._{m.e.} = 32 bars (P, 361). Le moteur à rapport de compression variable CONTINENTAL AVER-1100, moteur en mesure de résister à la valeur intermédiaire de 170 bars est doté de piston à rapport de compression variable donnant un rapport minimal de 8 fonctionnerait à une P._{m.e.} (P, 367) de 42 bars, le moteur démarre à $- 34^{\circ}\text{C}$.

2.4.- SURALIMENTATION

Pour un régime et une avance à l'injection donnés une augmentation de la pression de suralimentation entraîne (48) : une diminution du délai d'inflammation ; un déplacement vers la droite du P.M.H. de la position angulaire de la pression maximale de combustion ; une augmentation de la durée totale de combustion. En refroidissant (3) les gaz avant leur admission au moteur, on réalise à la fois une augmentation de leur densité (bon remplissage) et de la puissance obtenue. Sous une pression d'alimentation donnée et pour un même carburant une meilleure résistance à la détonation. La suralimentation (33), l'élévation du niveau de température et de pression de l'air réduit le délai d'allumage, donne une élévation du niveau de pression, mais le démarrage n'est pas assuré. La suralimentation (43) permet en principe d'améliorer la puissance du moteur en raison de l'augmentation de la quantité de mélange combustible introduit dans le moteur à chaque tour. La suralimentation permanente permet, par l'échauffement de l'air admis, d'abaisser le rapport volumique du cylindre en maintenant de bonnes conditions d'allumage. Cet avantage se paye cependant par une baisse de rendement. Lorsque (61) la densité de la charge est élevée, le délai d'allumage est réduit, il en résulte que la suralimentation rend un moteur moins sensible à la qualité d'allumage des

carburants employés. Doubler la densité de l'admission donne plus du double de la pression moyenne effective, alors que la pression maximum n'est accrue que de 40 à 50 %. La suralimentation augmente le couple au bas régime.

2.5.- ETANCHEITE DU CYLINDRE

Il est naturel de supposer que l'accroissement de la pression (52) et de ce fait l'accroissement de la température pendant l'entraînement avec alimentation en carburant, soient dus aux effets du carburant accumulé dans le cylindre. La pré-injection augmentait la pression de compression de pointe d'environ (3,5 kg/cm²). Sans injection la variation de la pression de pointe est nulle. Un accroissement de taux de compression et une amélioration de l'étanchéité résultent du carburant accumulé. La quantité de liquide de pré-injection était d'environ 1,5 cm³ ; cela signifierait un accroissement du taux de compression de 17 à 17,8, ce qui donne un accroissement de pression de pointe de 2,8 kg/cm². En injectant le carburant d'abord, la pression baisse et après augmente. Une bonne étanchéité des segments augmente la qualité de démarrage du moteur.

2.6.- VITESSE DE ROTATION

Le moteur diesel nécessite (15) une vitesse de rotation plus élevée pour le démarrage que le moteur à essence. Pour obtenir une diminution de perte de charge, une pression et une température nécessaires à l'inflammation du carburant à froid, il faut réduire au minimum la durée du cycle de compression, c'est-à-dire augmenter au maximum la vitesse de rotation du moteur lors du démarrage. La valeur moyenne de la pression et de la température à la fin de compression augmente avec l'augmentation du régime de rotation et est très sensible dans la gamme de 50 à 160 tr/mn. Mais à des régimes beaucoup plus élevés l'intensité d'accroissement baisse visiblement. Ceci peut s'expliquer par le fait que l'augmentation de la vitesse de rotation du vilebrequin dans la gamme précitée présente la meilleure influence sur la diminution des fuites de la charge et de la chaleur et de ce fait augmente la pression et la température de fin de compression. Mais à une vitesse de rotation plus élevée le remplissage n'est pas parfait et l'augmentation diminue.

La température des parois intérieures du cylindre et de la tête du piston augmente très peu (1 - 2°C) après une rotation ininterrompue d'une minute (27). En augmentant la vitesse de rotation la dépression dans l'admission augmente et la température baisse. L'augmentation du régime (48) réduit le délai d'inflammation, la durée totale de combustion et par conséquent la chaleur cédée aux parois (52). La vitesse élevée est un moyen d'obtenir une température élevée de compression (64). Le moment d'inertie du volant doit aider à l'uniformisation de vitesse, lorsque chaque piston arrive au P.M.H. Quand

la température diminue de 60 à 10°C la vitesse de rotation diminue de 42 % et la puissance électrique nécessaire augmente de 37 %. Avec un lubrifiant fluide à la température de 10°C, la vitesse a augmenté de 45 % et la puissance électrique nécessaire a diminué de 20 % (48). Pour une pression de suralimentation et une avance à l'injection données, un accroissement du régime a pour effet une diminution exprimée en temps, du délai d'inflammation, du décalage entre le P.M.H. et la position du maximum de la pression de combustion et de la durée totale de combustion.

III.- CARBURANT

Les combustibles à l'indice de Cétane élevé sont inflammables dans les basses températures. Ils permettent une marche douce, peu bruyante (6). On donne la relation entre l'indice de Cétane et Octane par :

$$I_c = 60 - \frac{I_o}{2}$$

L'ordre d'inflammation des carburants (16) est, n heptane-iso-octane-benzène. Pour abaisser la limite d'inflammation on ajoute (35) des peroxydes, et des dérivés nitrés organiques, etc ... Le combustible (51) doit pouvoir être pulvérisé aux températures que l'on rencontre. Un indice de Cétane élevé et un point d'éclair assez haut sont nécessaires pour éviter les risques d'incendie.

Les qualités nécessaires à un combustible diesel convenant aux basses températures sont un indice de Cétane élevé et un faible point d'écoulement. Le combustible de type "*Premium*" de la "*Standard de Californie*" à un point d'écoulement inférieur à - 55°C. "*Shell Oil C°*" a fourni des combustibles purifiés pour diesel avec 4 points d'écoulement - 62, - 80, - 74, - 110°C.

3.1.- ADDITIFS OXYDANTS

Un effet promoteur (16) peut être atteint au moyen de composés actifs du type aldéhyde pour réaliser plus rapidement l'auto-inflammation. Les aldéhydes peuvent être produits directement à partir du carburant initial, et utilisés avec succès pour hâter l'inflammation. C'est ce que l'on réalise dans le procédé (VIGOM) en injectant une première fraction de combustible au voisinage de P.M.H. échappement. L'apport de chaleur par le piston dans sa position haute, l'état thermique élevé créé par l'évacuation des gaz d'échappement, sont suffisants pour provoquer une bonne vaporisation du combustible et une première transformation sous forme de produits oxygénés. L'évolution chimique arrêtée pendant l'aspiration d'air frais reprend, au cours de la compression et conduit à une inflammation de la charge principale injectée suivant le procédé classique. Les hydrocarbures les moins résistants ont été trouvés dans les groupes oléfiniques, particulièrement le pentane 1 et l'exène 2. Une sélection judicieuse (51) de combustibles appropriés par le recours à l'élimination des paraffines et résines et l'addition de produits abaissant le point d'écoulement, il est possible d'obtenir un combustible donnant satisfaction, mais à prix élevé.

3.2.- FLUIDE DE DEMARRAGE

L'éther diéthylique (51) est le meilleur fluide de démarrage (en - 48°C dans quelques secondes). Il faut continuer l'injection (13) du fluide de démarrage jusqu'au moment où le carburant s'enflamme régulièrement. Le temps total en fonction de la température peut atteindre quelques dizaines de secondes, il dépend du débit du fluide, au fur et à mesure que le moteur se réchauffe la quantité de liquide admise diminue jusqu'à sa stabilisation à une certaine quantité minimum et finalement s'arrête complètement. Les fluides de démarrage dans les différents pays sont (23) : en France "*Start-pilot*" ; en U.S.A. "*Spray*" et "*Shevron*" ; en G.B. "*Caltex*" ; en U.R.S.S. "*Kholod-D-40*". Le composant principal est l'éther diéthylique. Le principe de mélange de liquide et d'air comprimé est utilisé par l'intermédiaire d'un carburateur dans l'admission par une température de - 10°C, le démarrage du moteur D 160 à l'aide du liquide "*Kholod-D-40*" s'effectuait à un régime de 30 tr/mn. L'apport de carburant pilote (33) donne une préoxydation efficace et contrôlée, raccourcit d'allumage mais entraîne une complication des mécanismes d'injection. L'injection dans le cylindre est complexe et coûteuse.

IV.- LES ACCESSOIRES FACILITANT LE DEMARRAGE

Nous appelons accessoire le moyen qui aide le démarrage. Son rôle est terminé lorsque le moteur démarre. Par cette définition, le fluide de démarrage aussi fait partie de ce groupe. On peut citer le réchauffage d'air, d'huile, du carburant, du moteur, le démarreur, la batterie ...

4.1.- RECHAUFFAGE DE L'AIR D'ADMISSION

Le réchauffage de l'air d'admission, donne une élévation du niveau de température (33), raccourcit le délai d'allumage, mais diminue la densité de l'air, réduit la puissance. Le réchauffage de l'air d'admission par circuit d'eau autonome donne une élévation du niveau de température, raccourcit le délai d'allumage. Le démarrage et les faibles charges ne sont pas assurés, la puissance est diminuée. Le recyclage des gaz d'échappement donne une élévation du niveau de température et l'action des particules partiellement oxydées réduit le délai d'allumage, mais diminue la charge d'air, le démarrage n'est pas assuré ; la mise en oeuvre est difficile. L'allumage par bougie peut faciliter le démarrage, il existe des complications dans le cas de bougies à étincelles. En augmentant (50) la puissance de préchauffage de 400 à 800 Watts, on a pu baisser le régime de démarrage par une température de -10°C de 100 à 80-85 tr/mn. L'addition auxiliaire de chaleur en fournissant de la chaleur (51) à la tubulure d'admission d'air est obtenue en brûlant une quantité limitée de combustible.

Le chauffage de l'air doit être appliqué (52) après la fermeture de la soupape d'admission, afin qu'il ne se produise pas de perte de densité. Pour cet effet la bougie de réchauffage est préférable. L'emploi d'un brûleur présente l'inconvénient supplémentaire de réduire le remplissage et la pression partielle d'oxygène. La perte de chaleur est considérable : 4 % seulement reste à la fin de la course d'admission pour l'air aspiré. Le temps de démarrage est décroissant par rapport à la puissance du réchauffeur. La fonction d'une bougie de réchauffage est de fournir une source d'allumage à haute température plutôt qu'une source de chaleur. On préfère l'utilisation de la flamme au réchauffeur électrique (64), parce qu'il ne gêne pas la batterie et ne demande pas beaucoup du courant électrique. Les bougies ne sont pas utilisables à cause de la quantité du courant électrique nécessaire, si on les met en série, la coupure de l'une arrête le courant. Le courant peut passer dans la masse par l'intermédiaire des suies et des dépôts carbonés. Pour les améliorer du fil fin est utilisé et protégé par un couvercle contre les dépôts de carbone et ils sont branchés en parallèle.

4.2.- RECHAUFFAGE DE L'HUILE DE GRAISSAGE

Le préchauffage de l'huile du carter du moteur s'effectuait (17) à l'aide d'un chauffe-liquide. Les essais étaient effectués avec circulation forcée du liquide et à thermosiphon pendant tous les essais d'huile du carter était chauffée par les gaz chauds du réchauffeur. Les essais étaient effectués avec circulation forcée de l'huile dans le système de lubrification et sans circulation. La circulation forcée était obtenue à l'aide d'une pompe entraînée par un moteur électrique indépendant, d'un débit de 10 litres/mn. On a conclu que le préchauffage de l'huile dans le carter à 70°C, ne contribue pas à l'élévation de la température des paliers. Le pompage de l'huile chaude à travers le système de lubrification ne provoque qu'une légère augmentation de la température des paliers. Dans ce cas la vitesse de réchauffement des paliers ne dépasse pas 1,5°C/mn. Le réchauffage plus rapide des paliers jusqu'à 6°C/mn s'effectue après dégommage et démarrage du moteur. Le pompage de l'huile chaude à travers le circuit de lubrification par température basse a pour effet de diminuer de 30 % le moment de résistance au dégommage, de diminuer le temps de démarrage du moteur de 4 à 6 fois par une température de - 14°C, le pompage de l'huile (62) augmente la température dans le carter jusqu'à + 25°C et dans les paliers du vilebrequin jusqu'à + 4°C.

4.3.- RECHAUFFAGE DU CARBURANT

Le réchauffage du carburant est inefficace en tant qu'auxiliaire de démarrage (52), parce que la perte de chaleur est excessive dans la canalisation et l'impact du carburant contre la paroi froide s'accompagne d'une perte de chaleur.

4.4.- RECHAUFFAGE DU MOTEUR

Le préchauffage du liquide de refroidissement s'effectuait (17) à l'aide d'un chauffe-liquide. Le préchauffage du liquide de refroidissement à 90°C ne contribue pas à l'élévation de la température des paliers. Les réfrigérants incongénables utilisés sont les mélanges eau-éthylglycol, alcool butylique (point de congélation - 58°C), etc ... Un système de climatisation hivernale d'un moteur peut le protéger contre le froid (53), il peut comporter le chauffage des organes vitaux, l'utilisation d'un réfrigérant avec réchauffeur, muni d'un injecteur de vapeur qui pulse le réfrigérant chauffé à travers le système. On peut utiliser l'air chaud pour le réchauffage.

4.5.- DEMARREUR

Il est nécessaire de disposer d'une puissance suffisante pour entraîner le vilebrequin à un régime (51), qui soit au minimum

le dixième de celui correspondant au service normal. Le démarrage d'un moteur diesel est effectué à l'aide d'un démarreur ; électrique, hydraulique, pneumatique, démarreur à combustion (moteur à essence) ou manuel. Les meilleures solutions actuelles permettant d'assurer le démarrage des moteurs diesel aux basses températures sont dans l'ordre, les démarreurs hydrauliques, les petits moteurs de démarrage à essence, les démarreurs électriques utilisant des batteries spéciales. Toutefois aucune de ces méthodes n'est entièrement satisfaisante. Le système hydraulique est meilleur que l'électrique, son avantage est qu'il peut être rechargé à la main par une pompe, son inconvénient est d'utiliser un grand volume du liquide.

4.6.- BATTERIE

La résistance interne de la batterie augmente beaucoup à froid et le voltage diminue (69).

Il faut que la température d'une batterie soit supérieure à 0°F pour pouvoir donner la charge (64). Le rendement de la batterie diminue avec la charge. Avec une batterie de 30 V., le moteur démarre à - 38°F avec une vitesse de 28 tr/mn dans 36 secondes. Il faut avoir recours à des batteries spéciales (Nickel-Cadmium) à plaques frittées et électrolyte alcalin.

4.7.- HUILE DE GRAISSAGE

Il faut tabler sur une viscosité de 10.000-40.000 S.S.U. (Secondes Saybolt Universelles) pour l'huile de graissage de façon qu'elle puisse être pompée et que le moteur puisse être entraîné sans dépense excessive de puissance, ni usure des coussinets (51). Les lubrifiants synthétiques, la dilution au fluorure de carbone, des surfaces de frottement sèches peuvent être envisagés. Deux surfaces d'oxyde de nickel en contact frottent, opérant avec un coefficient de frottement extrêmement faible et pouvant fonctionner très longtemps sans usure appréciable. Les meilleurs lubrifiants pour les basses températures sont les polyéthers, les di-éthers synthétiques. Les huiles de silicone ont une viscosité constante en fonction de température, leurs autres caractéristiques sont : le point d'écoulement à - 90°C, le point d'éclair très élevé, la bonne stabilité aux températures élevées. On diminue la viscosité du lubrifiant en cas de basses températures en mélangeant de l'essence à l'huile de graissage. Lors de la montée des températures (54) de fonctionnement l'essence se dissocie du lubrifiant par évaporation. La viscosité de la meilleure huile d'hiver (13) pour diesel à la température - 20°C est égale à 10.300cst et la viscosité de l'huile épaisse AS Z_D - 10 à la même température est de 4.050cst. Dans des conditions de froid intense de l'ordre de - 32, - 33°C, même les huiles fluides perdent leur

qualité. Dans de telles conditions il est nécessaire de diluer l'huile épaisse avec du carburant diesel. En ajoutant 20 % de ce carburant à l'huile MT-14P sa viscosité jusqu'à une température de - 40°C ne dépasse pas 15.500 est, c'est-à-dire qu'il permet le démarrage du moteur à l'aide du fluide de démarrage.

V.- MESURE DE TEMPERATURE DANS LES MOTEURS

Pour étudier les phénomènes thermiques, la connaissance de la température est primordiale. La mesure de température dans les moteurs est très délicate à cause de la rapide variation de celle-ci et de nombreuses exigences imposées pour la technique de l'instrument de mesure.

5.1.- TECHNIQUE DE MESURE DES TEMPERATURES INSTANTANÉES DU FLUIDE MOTEUR

La température des gaz dans le moteur varie rapidement, l'instrument mesureur doit avoir un temps de réponse très réduit et pouvoir résister aux chocs mécaniques thermiques et à l'oxydation.

5.1.1.- Pyrométrie optique

La pyrométrie optique groupe les méthodes de mesure qui utilisent les paramètres définissant le rayonnement d'un corps pour déterminer sa température. Spectre d'absorption et d'émission des corps sont en général utilisés.

MEYER et UYEHARA en U.S.A. et MONNOT en France ont utilisé le spectre d'émission (24). L'utilisation des méthodes optiques suppose une fenêtre transparente dans le moteur. Les courbes de température s'écartent largement des températures déduites de l'enregistrement des pressions.

5.1.2.- Emploi des thermomètres à résistance

L'inconvénient principal de ces appareils est la nécessité de satisfaire à deux exigences contradictoires, résistance mécanique suffisante et faible inertie, la mesure est locale. On arrive à diminuer le temps de réponse des thermomètres à résistance en réduisant le diamètre du fil utilisé (jusqu'à quelques microns). Le seul ennui majeur reste la résistance mécanique. La précision de cette technique est de l'ordre de 4 à 5 % (20). Nous pensons utile de parler du temps de réponse d'une sonde thermique ainsi que des relations entre l'évolution périodique de la température d'un milieu et d'une sonde thermométrique plongée dans ce milieu.

a.- Notion du temps de réponse d'une sonde thermométrique

Supposons qu'à un moment donné, la sonde soit effectivement à la température T_0 du milieu qui l'environne (67). Si à l'instant t_0

la température du milieu passe brusquement de T_0 à T_F , la sonde ne prendra pas immédiatement cette nouvelle température ; à l'instant t , elle aura une valeur $T < T_F$, mais la différence $(T_F - T)$ décroît régulièrement en fonction du temps suivant une loi logarithmique :

$$T_F - T(t) = (T_F - T_0) e^{-\frac{t}{\tau}}$$

$\tau = \frac{mc}{KS}$ la constante de temps de la sonde considérée.

Théoriquement, un temps infini serait nécessaire pour que l'écart de température s'annule (fig. 1). La sonde est pratiquement à la température T_F à la précision près des mesures, au bout d'une durée égale au temps de réponse de la sonde (5τ).

Notons que l'emploi d'une sonde à très faible inertie ne se justifie que si le dispositif de mesure qui lui est associé a un temps de réponse suffisamment faible pour ne pas limiter lui-même le temps de réponse de la chaîne de mesure complète. Quoiqu'il en soit, l'équilibre de température entre la sonde et le milieu ne peut être atteint lorsque la sonde favorise le passage d'un flux calorifique vers l'extérieur ou donne lieu à des pertes par rayonnement interne. Même avec une température uniforme dans le temps, il s'établit une différence de température permanente entre le milieu et la sonde du fait du flux de chaleur correspondant à ces différentes pertes.

b.- Relation entre l'évolution périodique de la température d'un milieu et une sonde thermométrique plongée dans ce milieu

La figure (2) présente le profil d'une variation périodique de température ainsi que le décalage en température et en phase produit par deux sondes ayant le temps de réponse différent (67). Pour relier la température indiquée par la sonde et la température du milieu on peut dire qu'à tout instant l'échauffement de la sonde est égale à la chaleur cédée par le milieu extérieur plus l'échauffement par l'effet joule en cas d'un thermomètre à résistance soit (18) :

$$mc \frac{dT}{dt} = \frac{Ri^2}{4,18} + KS (T_F - T) \quad (1)$$

T = température instantanée de la sonde

T_F = température instantanée du milieu

m = masse du fil

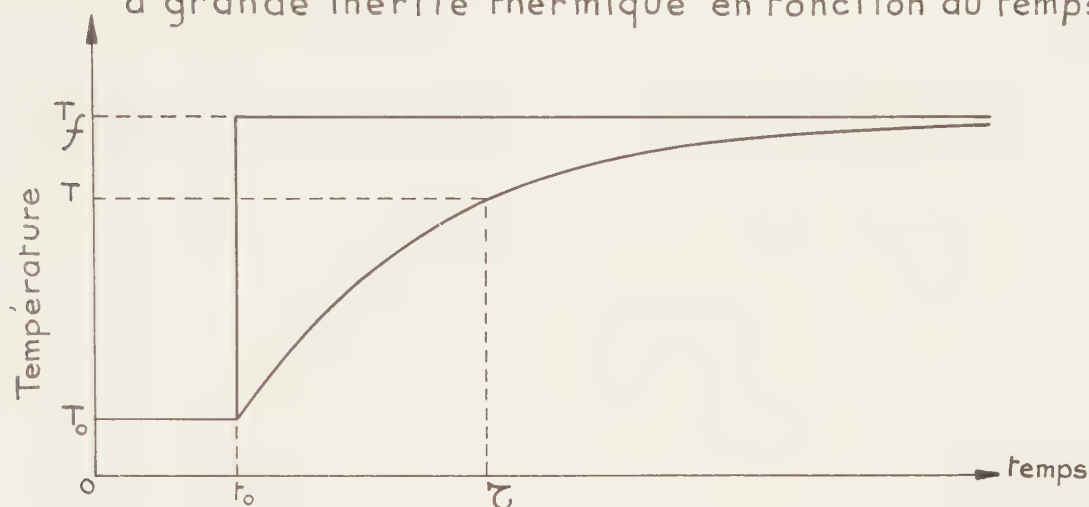
c = chaleur spécifique du métal du fil

S = surface du fil en contact avec le milieu ambiant

K = coefficient d'échanges thermiques du fil

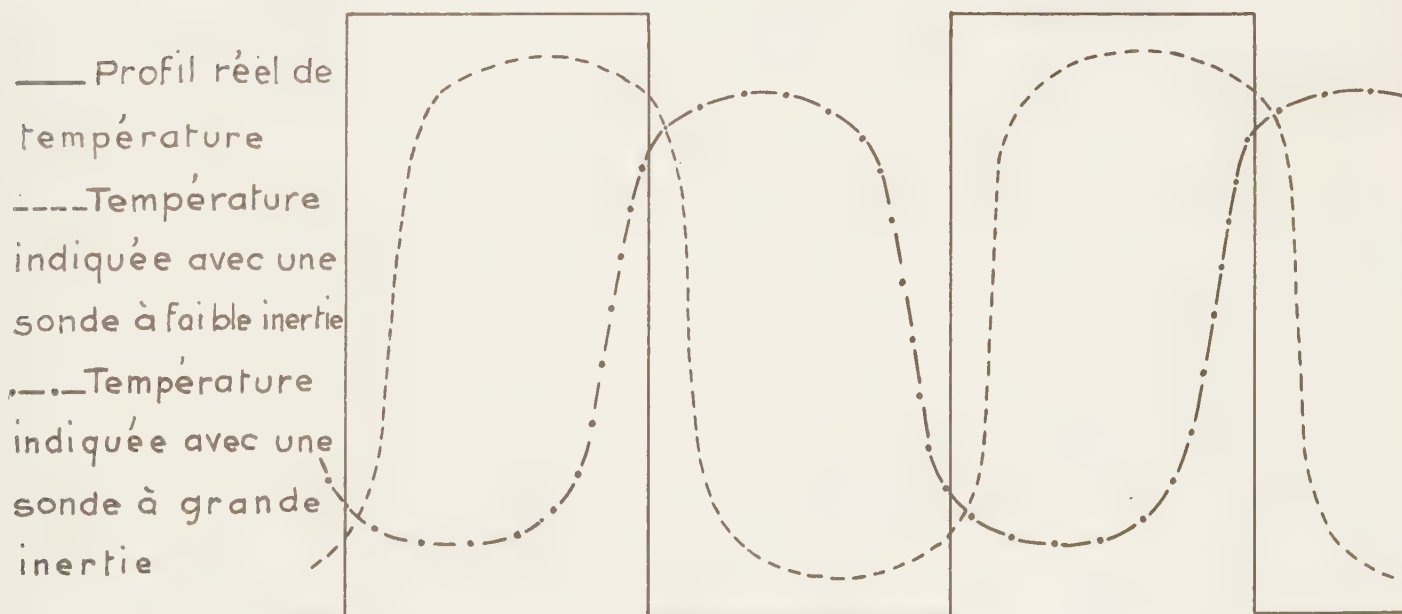
Variation de la température d'un thermomètre à grande inertie thermique en fonction du temps

①



②

Démonstration du déphasage d'une température périodique relevée par deux sondes ayant des temps de réponse différents



Nous avons choisi un courant d'alimentation de 1 à 2 mA pour pouvoir négliger l'effet de Joule, d'où la relation (1) prend la forme :

$$\tau \frac{dT}{dt} + T = T_F \quad (2)$$

où $\tau = \frac{mc}{KS}$: constante de temps de la sonde

Considérons le développement en série de FOURIER qui met en évidence l'amplitude et le déphasage des divers harmoniques associés à la température de gaz sous la forme (8) :

$$T_F^t = T_F^o + \sum_{n=1}^{n=\infty} T_F^{(n)} \cos(n\omega t + \varphi_n) \quad (3)$$

cherchons une solution particulière de l'équation (2) sous la forme :

$$T = T^o + \sum_{n=1}^{n=\infty} T^{(n)} \cos(n\omega t + \varphi_n + \delta_n) \quad (4)$$

Lorsqu'on remplace T_F et T par ses expressions dans l'équation (2), l'identification, terme à terme des deux développements fournit les relations suivantes :

$$T^{(0)} = T_F^{(0)} \quad (5)$$

$$T^{(n)} = \frac{T_F^{(n)}}{\sqrt{1 + n^2 \omega^2 \tau^2}} \quad (6)$$

$$\tan \delta_n = - n\omega\tau \quad (7)$$

d'autre part la solution générale de l'équation (2) sans second membre donne :

$$T = c e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (8)$$

La solution générale de l'équation (2) s'exprime sous la forme :

$$T = c e^{-\frac{t}{\tau}} + T_F^0 + \sum_{n=1}^{n=\infty} \frac{T_F^{(n)}}{\sqrt{1 + n^2 \omega^2 \tau^2}} \cos (n \omega t + \varphi_n + \delta n) \quad (9)$$

La constante c étant définie par la condition initiale, la présence du facteur $\sqrt{1 + n^2 \omega^2 \tau^2}$ dans l'expression montre que les harmoniques de rang élevé n'ont qu'une influence très réduite sur les indications fournies par le fil. Dans le cas particulier où la variation de température du milieu est de forme sinusoïdale simple, l'indication du thermomètre est également sinusoïdale.

Par suite de son inertie thermique, le fil thermométrique ne pourra pas suivre la température du gaz avec la précision voulue que si le nombre de tours est petit (65). A nombre croissant de tours, la température du fil retard de plus en plus sur la température du gaz. En considérant le transfert de chaleur entre gaz et fil dans un temps court dt , on peut écrire :

$$T_g = T_s + \tau \frac{dT_s}{dt} + \dots \quad (10)$$

Le second membre représente le développement de Mac-Laurin, arrêté à deux termes, de $T_s(t + \tau)$, de sorte que l'équation (10) traduise le fait que la température T_g du gaz au temps t est approximativement égale à la valeur qu'aura la température du fil au temps $(t + \tau)$.

Comme le développement exact de Mac Laurin de $T(t + \tau)$ comporte encore des termes avec la dérivée seconde et des dérivées de degrés plus élevé, qui ne figurent pas dans l'équation (10); il se fait que la température du fil ne peut suivre exactement des transitions brusques de la température du gaz, mais varie suivant une courbe arrondie. K et avec lui τ varie avec la vitesse et la pression du gaz circulant dans le moteur. Il faut essayer de prendre τ assez petit pour que la correction puisse être tout à fait négligée, même aux nombres de tours les plus élevés. Pour cela il est nécessaire de rendre le fil extrêmement fin, le retard diminue proportionnellement avec le diamètre.

La grande vitesse d'air cause le transfert de chaleur plus rapide entre le gaz et le fil, et la température du gaz est plus uniforme (63). La vitesse augmente la température maximum et le décalage angulaire de ces maximum. Le diamètre diminue la température maximum et augmente le décalage angulaire. Dans la gamme des vitesses essayées (600 à 1800 tr/mn), la vitesse du moteur semble avoir peu d'influence sur les caractéristiques de réponse du thermomètre à résistance. La turbulence provoque un rapide échange de chaleur entre le gaz et le

fil. La température du gaz est plus homogène. On peut penser donc que la température du fil suit de plus près la température du gaz quand il y a turbulence.

Pour les diamètres décroissants, les effets de la vitesse et taux de compression, sont petits dans les limites essayées ($\rho = 12,5$ à $15,8$, $V = 600$ à 1800 tr/mn). Mais sur les diamètres croissants l'effet de la turbulence peut être grande. Aux environs de 10 degrés après le P.M.H., le fil perd la chaleur, tandis que la température des gaz est plus élevée que la température du fil. Le même phénomène était remarqué par d'autres auteurs (63). Ce phénomène est visible aussi dans nos courbes mais aux basses vitesses. Il disparaît quand la vitesse augmente. En considérant l'augmentation de la pression et de la température aux vitesses élevées, il nous semble que cette perte peut être attribuée, aux pertes subies par le fluide qui sont importantes aux basses vitesses.

c.- Résumé des propositions formulées en a et b

- Connaissant le temps de réponse d'une sonde ou son déphasage, on peut s'en servir dans les relations (6) et (7) pour calculer la température du fluide .

- Nous attribuons la perte de chaleur indiquée par la sonde aux alentours de P.M.H. aux pertes subies par le fluide ;

- La sonde de très faible diamètre (10 microns) suit de très près la variation de température du fluide ;

- Pour la mesure de la température de la phase précédant le démarrage, le thermomètre à résistance est un moyen satisfaisant.

5.2.- TECHNIQUES DE LA MESURE DE LA TEMPERATURE DE LA SURFACE EN CONTACT AVEC LES GAZ

On peut considérer en première approximation la paroi du cylindre comme un solide semi-infini (68) initialement à température uniforme à laquelle on applique une température θ_s variant sinusoidalement avec une période T , d'où l'équation de FOURIER :

$$\frac{\delta \theta}{\delta t} = a \frac{\delta^2 \theta}{\delta x^2} \quad (1)$$

admet comme solution :

$$\theta = \theta_0 e^{-\frac{x}{\epsilon}} \sin \left(\omega t - \frac{x}{\epsilon} \right) \quad (2)$$

Transcrite, l'équation (2) en (1) donne :

$$\varepsilon^2 = \frac{2a}{\omega} = \frac{aT}{\pi} = \frac{a}{\pi N}$$

La quantité ε homogène d'une longueur est appelée l'épaisseur de peau. On voit qu'elle est proportionnelle avec racines carrées de la période T et de la diffusivité a . A une profondeur égale à 5ε l'oscillation de température est pratiquement éteinte. Dans le cas de la fonte, le coefficient d'affaiblissement n'atteint pas la valeur de 1 %. On ne doit pas s'attendre aux fluctuations de la température de la surface de la paroi supérieure à 20°C. La pénétration des fluctuations des températures est inférieure à un millimètre et l'importance de ces fluctuations à la surface même représente 1/100 de la fluctuation de la température du fluide moteur.

BENDERSKY (24) a utilisé un fil de nickel isolé thermiquement et électriquement par de l'oxyde de nickel. Une couche de fer est déposée sur l'oxyde de nickel. Après polissage métallique du cylindre ainsi constitué on dépose une couche de nickel par projection cathodique. Les épaisseurs des couches varient de 1 à 5 microns, par ce procédé, l'auteur obtient des fluctuations de la température au maximum 15°C au-dessus de la valeur moyenne. On peut considérer que la paroi se trouve sensiblement à une température absolue constante avec une précision de 2 %. Le procédé qu'a utilisé l'auteur pour appliquer le principe de thermocouple demande des moyens technologiques importants. Le temps de réponse des thermocouples est limité à cause de leur diamètre élevé dû au gainage électrique. Le thermocouple gainé que nous avons utilisé est maintenu contre la paroi intérieure à une distance de 2mm par un ressort spécial contenu dans ce thermocouple (fig. 12a). Il présente une faible augmentation de la température moyenne dans ce point au cours de l'entraînement du moteur. R. VICHNIEVSKY a utilisé en 1947 le principe du thermomètre à résistance pour la mesure de la température superficielle. La couche métallique en or ou platine était obtenue par une projection cathodique (18). La fabrication des thermomètres à résistance superficielle exige un usinage soigné et des moyens technologiques importants.

5.3.- DETERMINATION DE LA TEMPERATURE A PARTIR DES DIAGRAMMES DE PRESSION (24)

Pour déduire les variations de température à partir de ces enregistrements il faut connaître avec précision le débit du combustible et celui de l'air et disposer des diagrammes énergétiques correspondants au mélange avant la combustion et aux produits de combustion. Par ailleurs il faut connaître avec précision les conditions de température et de pression à l'entrée du moteur. Etant donné le nombre de ces mesures, il est difficile d'admettre que les valeurs de la température ainsi calculée en chaque point du cycle soient connues avec une très grande précision.



Fig.3 - Vue générale du montage à l'intérieur de la chambre froide

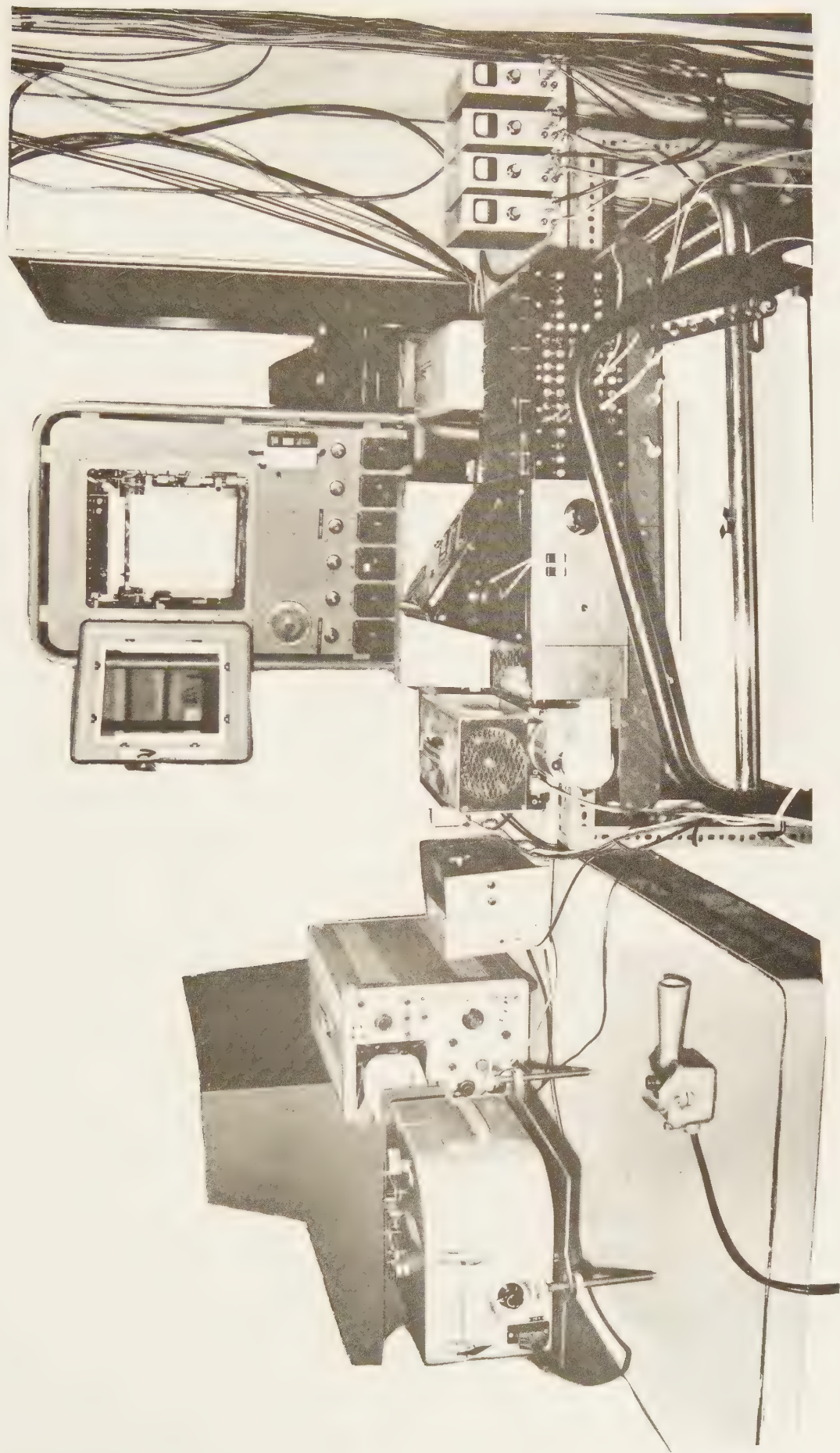


Fig.4 - Vue générale des appareils se trouvant à l'extérieur de la chambre froide

C.- MISE AU POINT DES MATERIELS ET DES METHODES
EN VUE D'ETUDE DU PROBLEME

Les caractéristiques du moteur servi pour les expériences
sont :

BERNARD-MOTEUR, diesel, type W 71
Mono-cylindrée, 4 temps, refroidissement à air
Taux de compression : 18
Alésage : 90
Course : 90
Cylindrée : 572 cm³
Puissance : 11 ch
Régime : 3000 tr/mn
Pompe d'injection et injecteur LAVALETTE
Tarage injecteur : 135 kg, jet cylindre : $\emptyset = 1$ mm
Ouverture d'admission : 12° avant P.M.H.
Fermeture d'admission : 42° après P.M.B.
Ouverture d'échappement : 42° avant P.M.B.
Fermeture d'échappement : 12° après P.M.H.
Avance d'injection : 38° avant P.M.H.
Avance d'injection au démarrage : 25° environ avant P.M.H.
Surdébit de démarrage : 50 mm³/coup jusqu'au-dessous de
1500 tr/mn

REMARQUES :

- Le moteur dispose d'un décompresseur, d'une résistance de réchauffage à l'admission, d'un doseur pour introduire un mélange de combustibles dans la tubulure d'admission :

- Nous n'avons utilisé aucune des aides facilitant le démarrage, citées en haut.

I.- MISE AU POINT DES MATERIELS D'EXPERIMENTATION

Pour étudier le départ d'un moteur diesel dans une chambre froide, nous avons cherché d'abord à réaliser un dispositif d'entraînement permettant d'obtenir des couples et des vitesses variables et pouvant fonctionner même aux basses températures. Dans ce but nous avons mis au point un montage mécanique. Ensuite le moteur se trouvant dans la chambre froide (fig. 3), il était nécessaire de pouvoir

commander et contrôler les opérations de l'extérieur (fig. 4) ; pour cela nous avons préparé un montage électrique et enfin nous avons cherché les moyens de capter et d'enregistrer les phénomènes.

1.1.- MONTAGE MECANIQUE

Caractéristiques des appareils utilisés :

Moteur électrique triphasé asynchrone NORMACEM
Puissance 10 ch, 7,4 kW
Vitesse en charge, 2850 tr/mn
 Δ 380 V, 15,4 A
La roue libre TOURCO
Type RP5
Couple maximal 5 m.kg
Vitesse maximale 3300 tr/mn

Pour disposer de vitesses de rotation variables, nous avons fait un premier montage à l'aide d'un moteur électrique de 3 ch et d'une boîte de vitesse COTAL. N'ayant pas obtenu satisfaction, nous avons remplacé le montage par un montage nouveau comprenant un moteur électrique de 10 ch. 2 boîtes de vitesses (SIMCA-BERLIET) et une roue libre TOURCO (fig. 5 et 6). D'abord la roue libre à rouleaux était placée entre le montage et le moteur diesel pour ne pas transmettre la vitesse de ce dernier en cas de démarrage vers les boîtes de vitesse. Mais après un certain temps, cette roue libre recevant des couples importants et des à coups a présenté des coincements. En raison des à coups, les goupilles se trouvant à l'intérieur de la roue, côté moteur, sont enfoncées, l'ouverture des trous est aplatie et bouchées, interdisant la sortie de ces goupilles ; au contraire celles de l'autre côté restent libres, de ce fait les rouleaux se sont mis en position inclinée, provoquant le blocage de la roue surtout aux basses vitesses (fig. 7). Ce problème nous a obligé à la mettre entre les deux boîtes de vitesse, afin de ne recevoir que des vitesses élevées et des couples réduits. Dans cette position, la roue libre a bien fonctionné, mais avec un inconvénient majeur ; le moteur accouplé à la boîte de vitesse au premier coup de démarrage était freiné et le démarrage arrêté.

La roue libre que nous avons utilisée est trop faible, mais il ne nous a pas été possible à ce moment là de disposer d'une plus forte.

1.2.- MONTAGE ELECTRIQUE

La marche du moteur électrique, des appareils enregistreurs et de l'injection sont synchronisés par des relais électriques (fig. 8 et 9) ; ils sont mis en route ensemble et au moment du démarrage, leur arrêt est automatique. Des interrupteurs manuels sont prévus pour pouvoir intervenir à chaque moment si nécessaire.

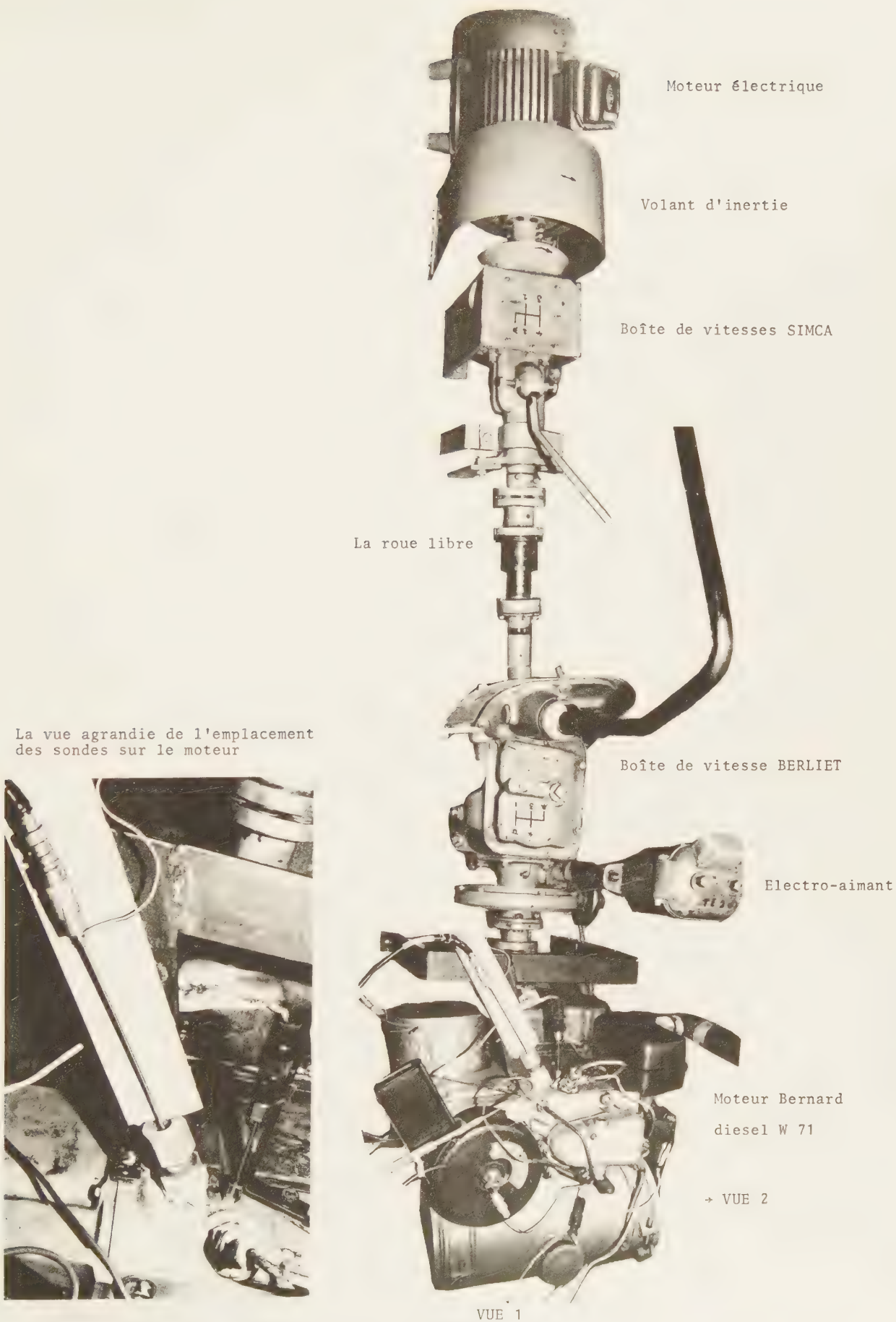
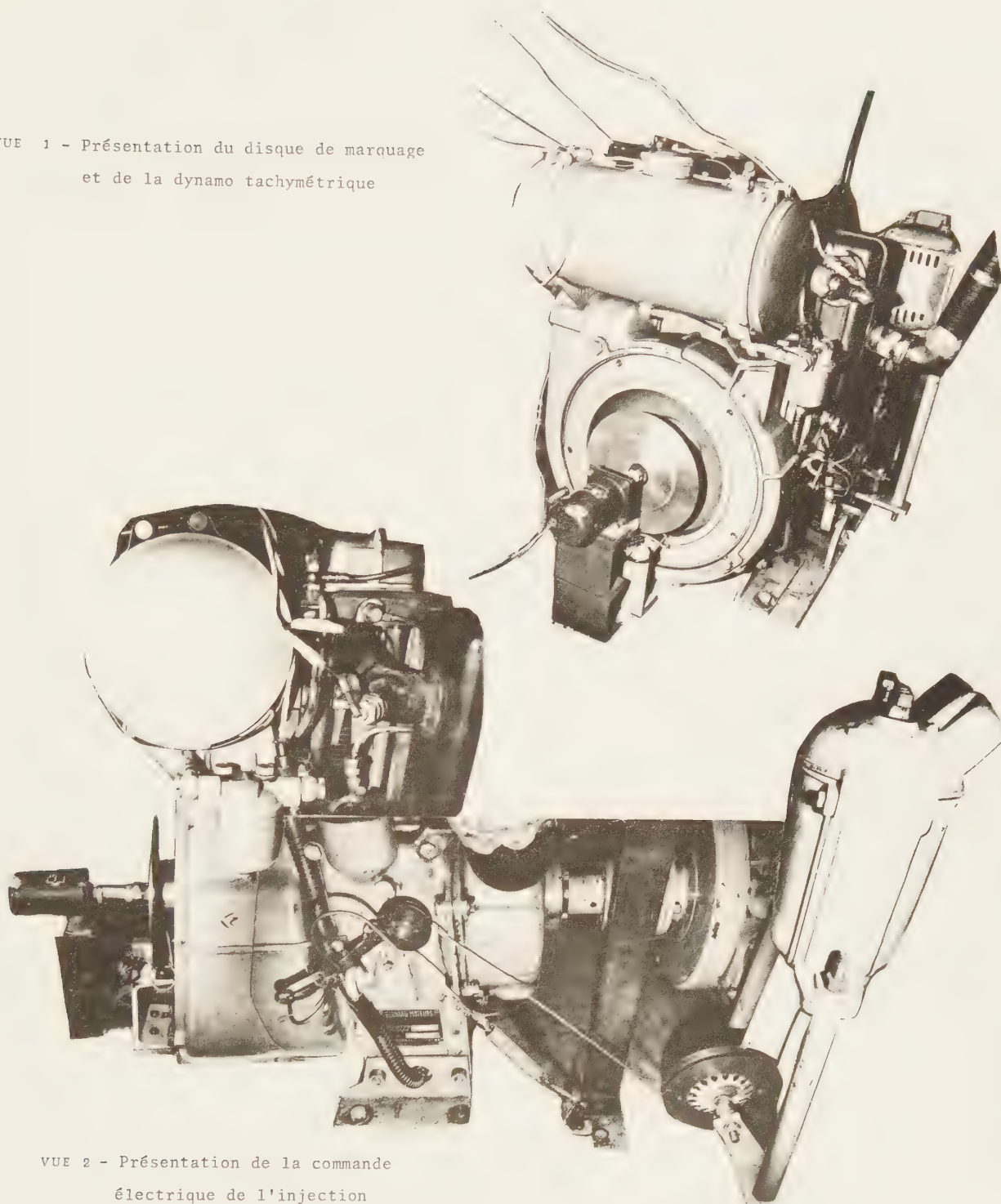


Fig.5 - Montage d'entraînement par le moteur électrique

VUE 1 - Présentation du disque de marquage
et de la dynamo tachymétrique



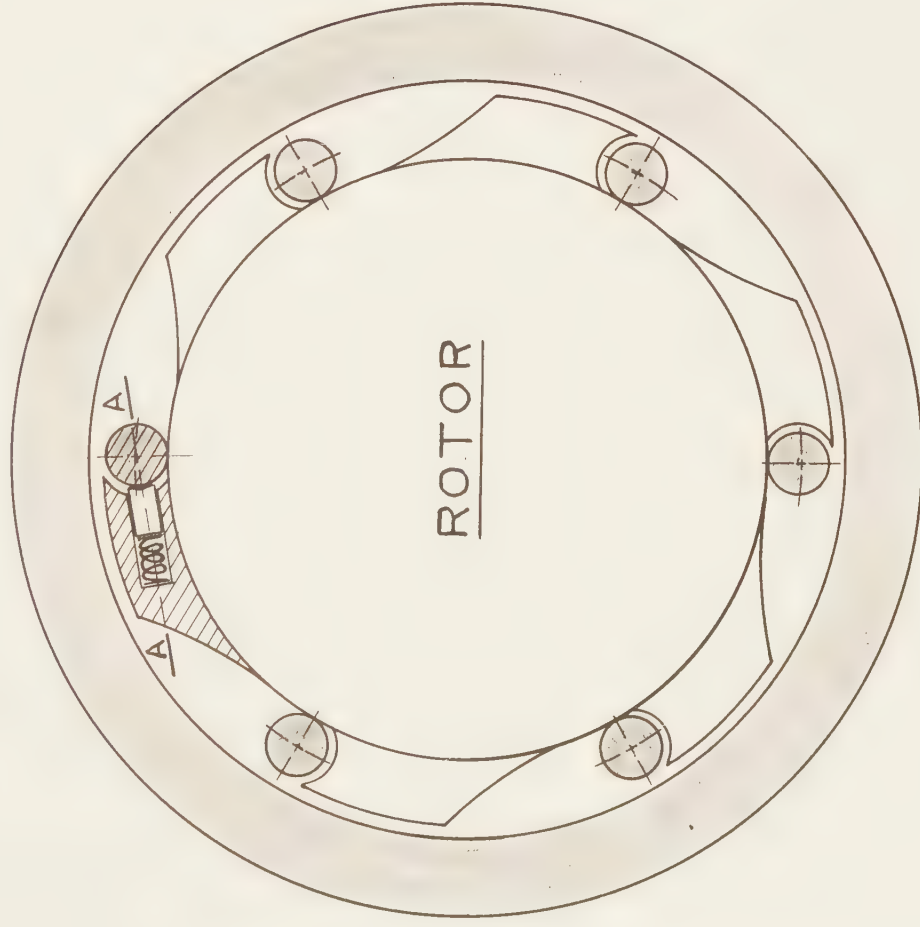
VUE 2 - Présentation de la commande
électrique de l'injection

Fig.6 - Présentation des vues 1 et 2, du montage de la Fig 5

Coupe de la roue libre

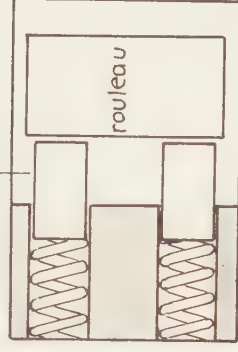
Démonstration de la raison de coïncement et sa détérioration

7



Coupe AA

goupille



Rouleau en
état normal



Rouleau
incliné

Côté moteur de la roue

STATOR

Une dynamo tachymétrique située sur l'axe du moteur débite au moment du démarrage de ce dernier une intensité de courant importante dans un relais électrique ; celui-ci commande l'arrêt d'un autre relais qui coupe le courant triphasé du moteur électrique, le courant monophasé des appareils enregistreurs et établit en même temps le courant par l'intermédiaire d'un relais temporisé dans un électro-aimant qui au moyen d'un système de poulies et de bras de levier coupe l'injection pour une durée déterminée.

1.3.- MOYENS CHOISIS POUR CAPTER LES PHENOMENES

Cette sorte d'étude étant abordée pour la première fois au C.N.E.E.M.A., nous avons dû rechercher des moyens appropriés.

1.3.1.- Capteur de pression

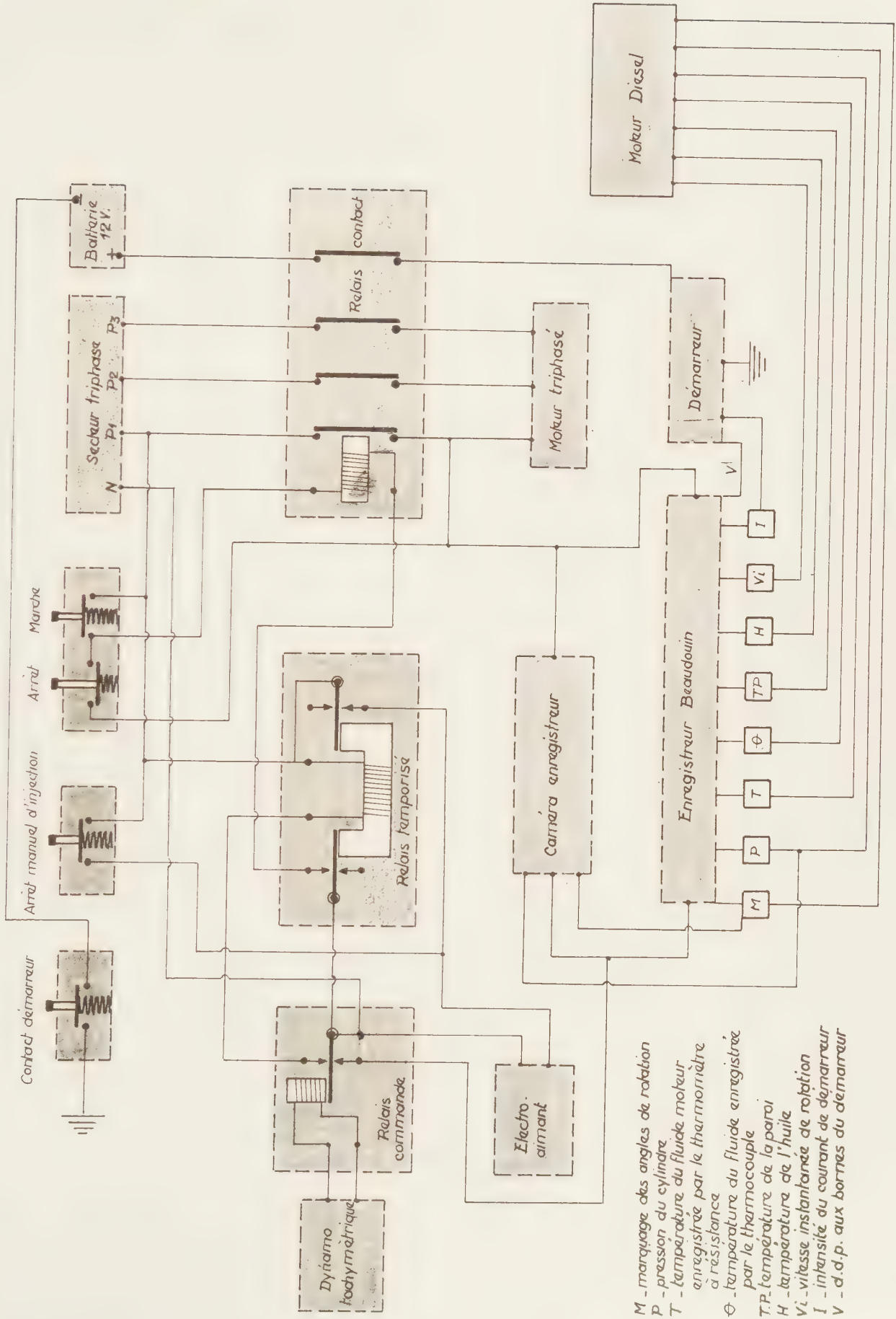
Nous avons utilisé un capteur de pression à quartz type 8QP500Ca fabriqué par la Société VIBROMETER. Pour le refroidissement de ce capteur dans la chambre froide, nous avons préparé un circuit à circulation d'alcool, mais en observant des dépôts dans les tuyaux de caoutchouc, nous avons craint d'avoir également des dépôts dans le capteur et nous avons aussi été amené à abandonner l'alcool, pour le remplacer par de l'air.

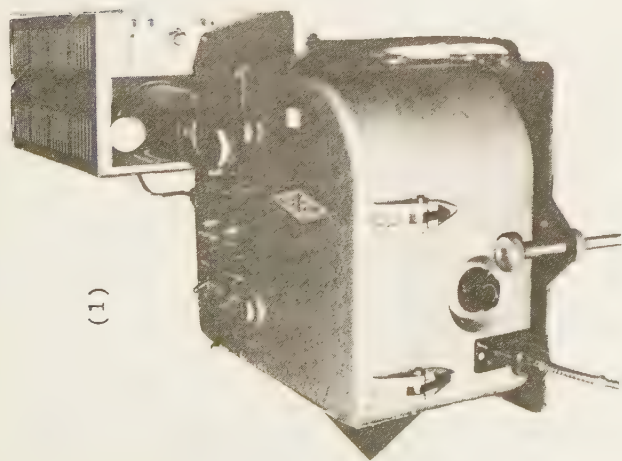
La position du capteur sur la culasse est représentée par le numéro 3 sur les figures 10 et 11.

1.3.2.- Capteurs de températures

La mesure des températures rapidement variables était très délicate, alors que celle-ci est un paramètre principal. Nous n'avons pu trouvé de thermocouples à temps de réponse suffisamment réduit et avons dû utiliser des thermocouples Chromel-Alumel gainés à extrémité de 1mm de Ø. L'un de ces thermocouples est représenté sur la figure 12a. Son extrémité par l'intermédiaire d'un ressort est pressée sur la paroi à une distance de 2mm de la face intérieure de la chambre de combustion (n°2 sur les figures 10 et 11). Le numéro 4 est entré dans la chambre de combustion ; l'étanchéité est assurée par un presse-étoupe. Le numéro 5 entre dans la tubulure d'admission. Un autre thermocouple est mis dans le carter d'huile. Le numéro 1 est un thermomètre à résistance pour mesurer la température du fluide moteur dans le cylindre ; il est constitué d'un anémomètre DISA type 55 A 74 de fabrication danoise (fig. 12 b) dont le fil a une longueur de 1,5mm et un diamètre de 10 microns. Nous l'avons adapté sur un presse-étoupe CONAX (fig. 12 b), utilisé sur les thermocouples ; pour obtenir l'étanchéité sur la sonde, le joint en LAVA est comprimé permettant de faire coulisser la sonde sans la déformer.

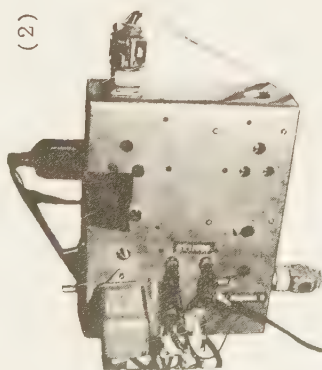
Fig. 8 Circuits de la commande automatique et d'enregistrements



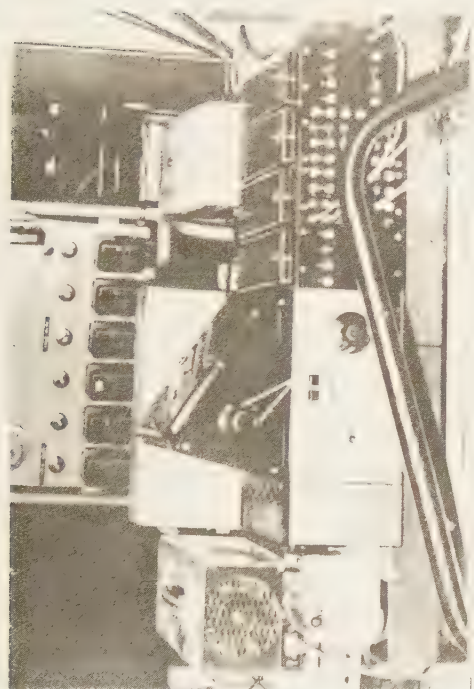
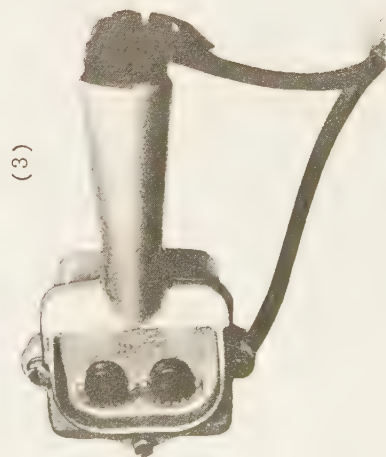


(1)

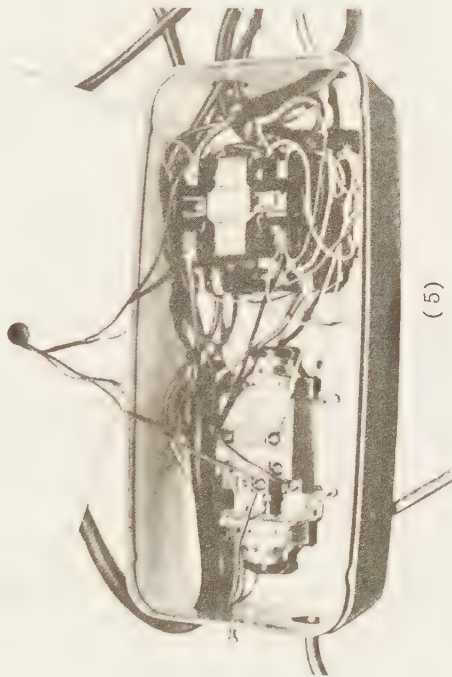
(2)



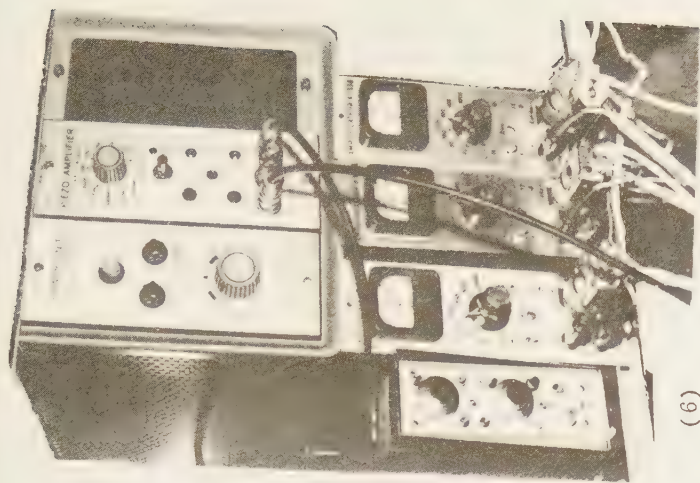
(3)



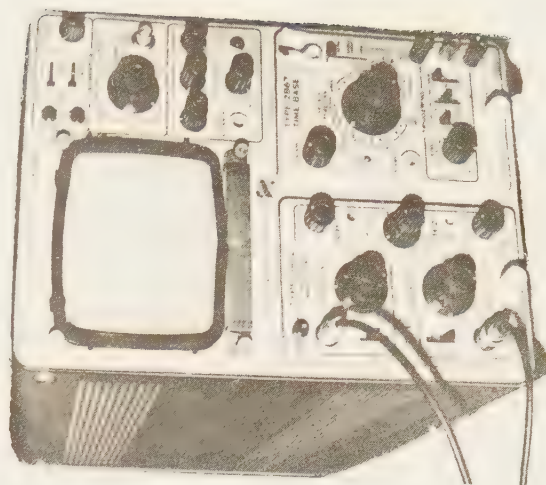
(4)



(5)



(6)



(7)

Fig. 9. Démonstrations en détaillé des appareils
 1. L'oscilloscope PHILIPS, raccordé sur la caméra TELEC (enregistrements)
 2. Relais de commande et la boîte contenant les circuits de marquage
 3. Interrupteurs manuels (Marche - Arrêt)
 4. Enregistreur, A.C.B. (enregistrements)
 5. Relais tout ou rien (Marche - Arrêt)
 6. Amplificateurs ROCHAR, piezo-amplificateur et le pont extensométrique
 7. L'oscilloscope TECTRONIX, type 564

- ① - Thermomètre à résistance
- ② - Thermocouple à ressort
- ③ - Capteur de pression
- ④ - Thermocouple à la ch. de comb.
- ⑤ - Thermocouple à l'admission

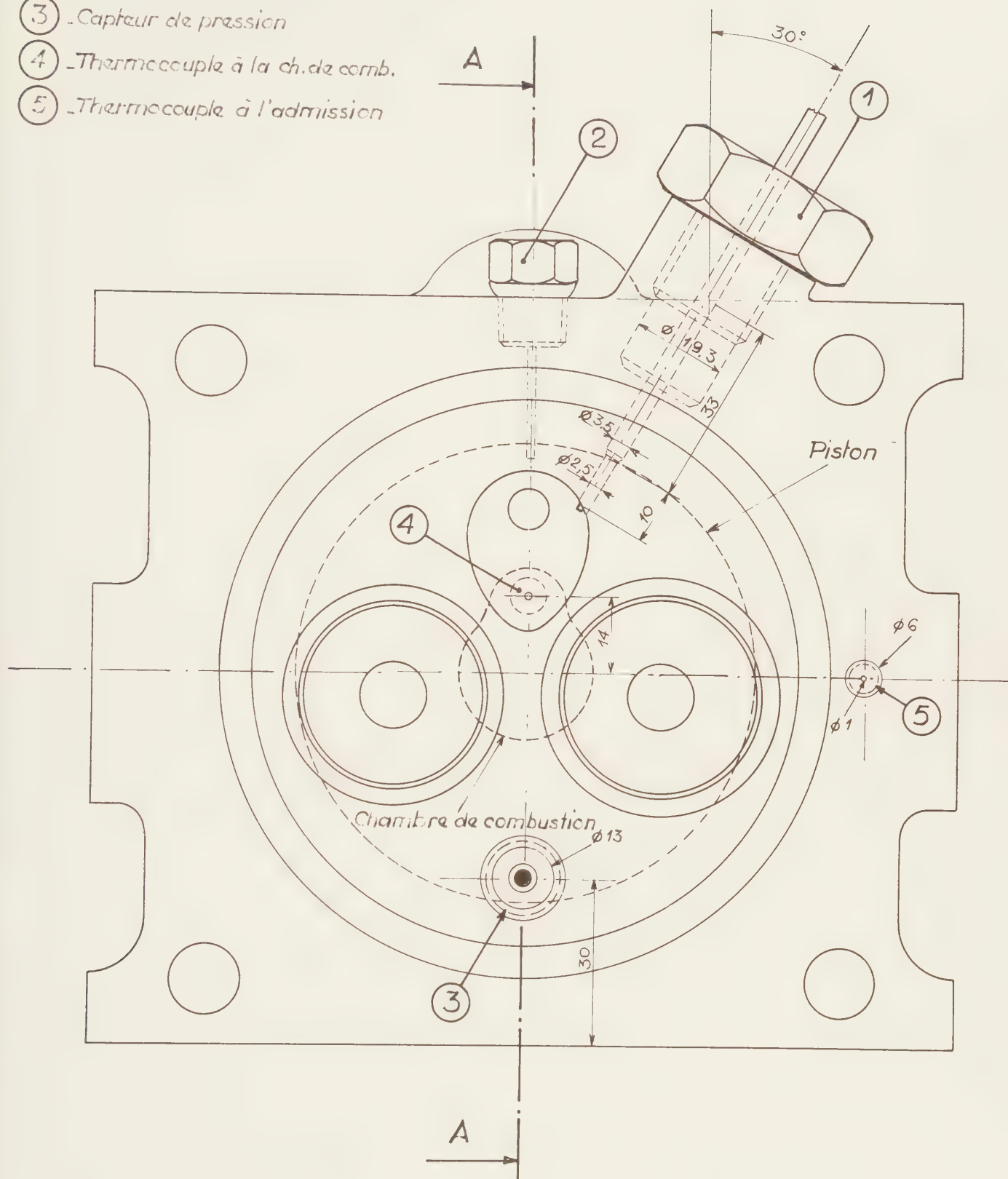


Fig. 10 - CULASSE (vue de dessous)

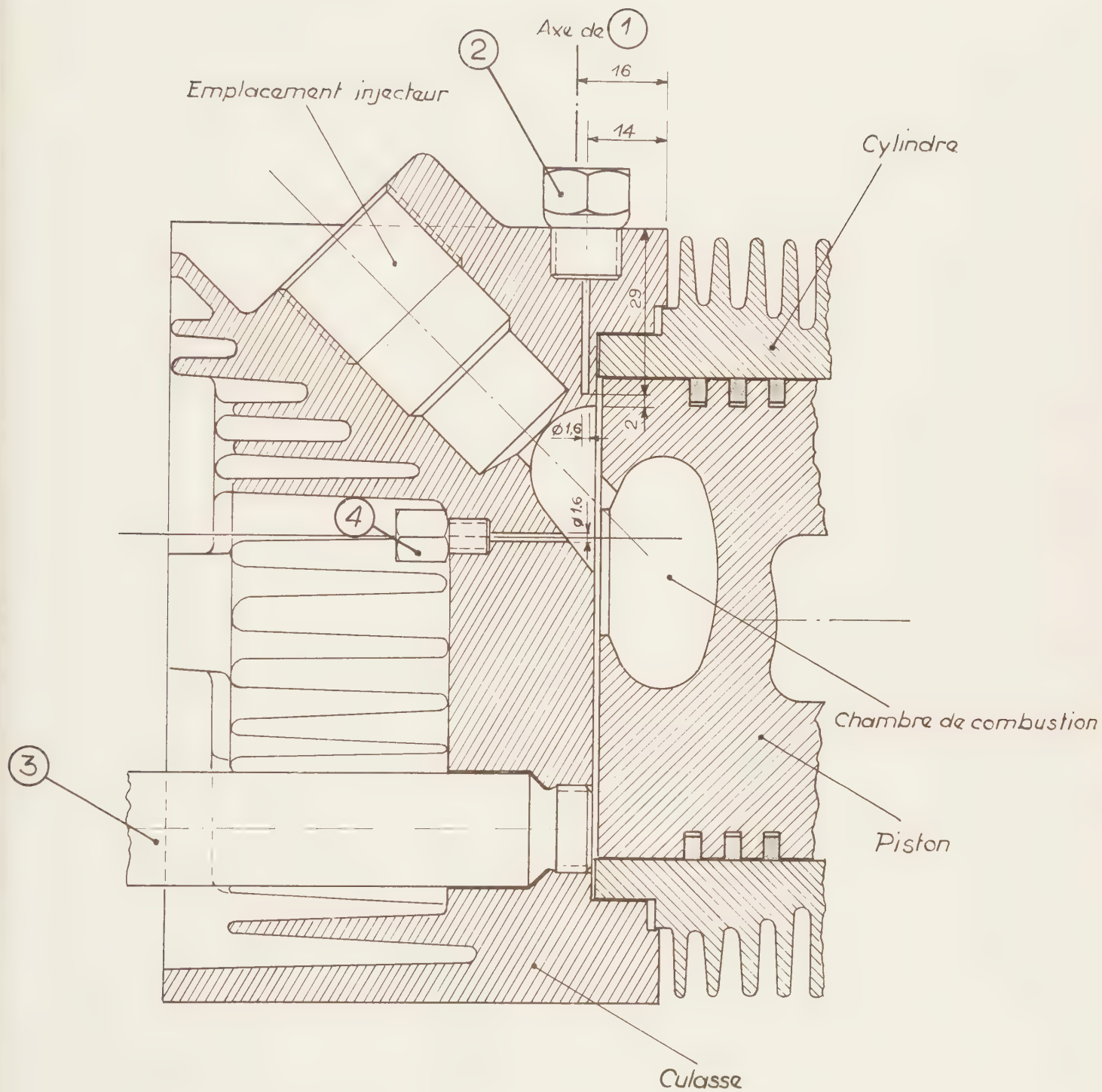


Fig. 11 - COUPE A-A

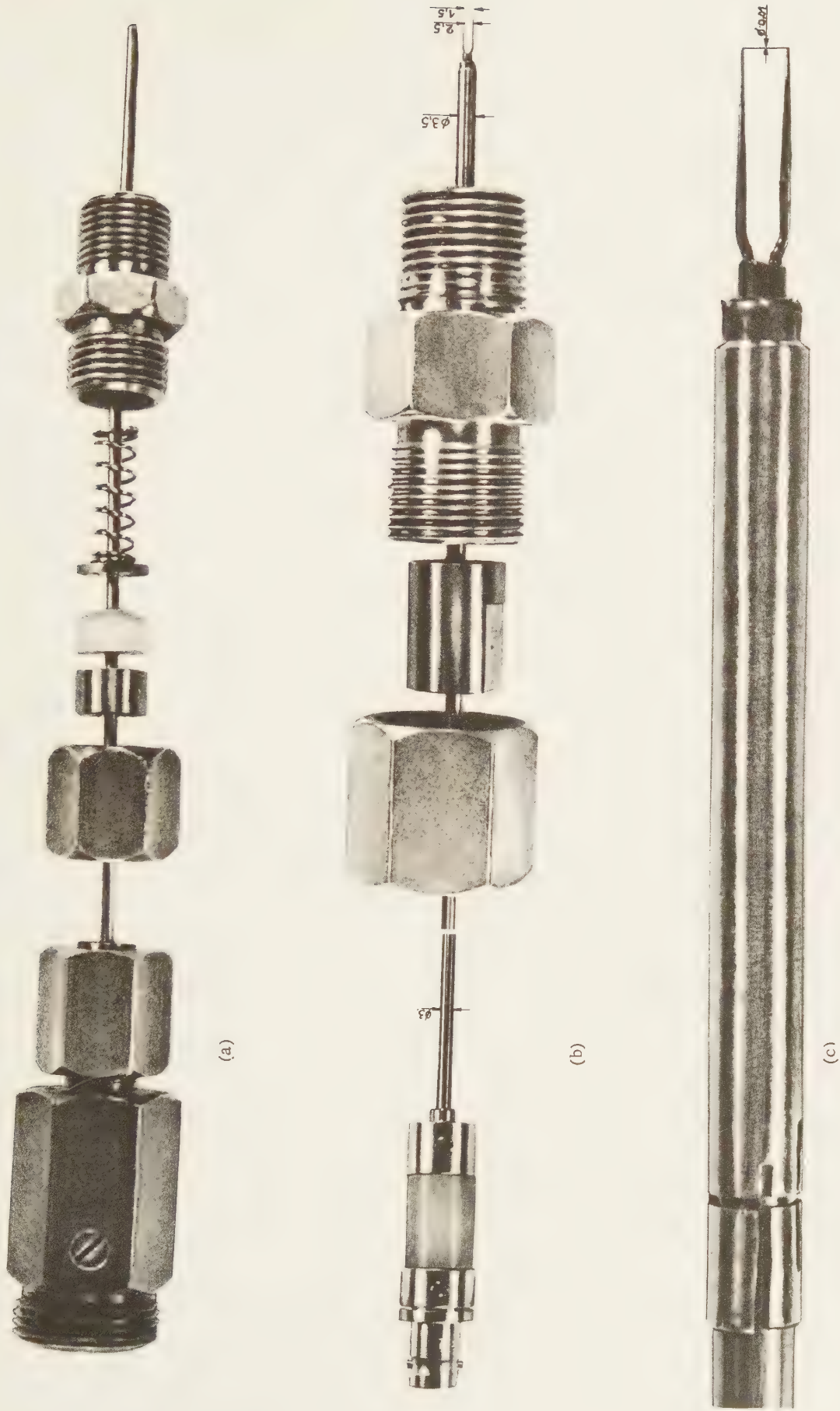


Fig. 12 Les sondes thermométriques

- a. Thermocouple Chromel-Alumel, gainé, type CONAX SL, appliqué par ressort assurant un contact uniforme.
- b. Anémomètre DISA, monté sur une presse-étoupe CONAX
- c. L'extrémité du thermomètre, munie d'un filament en platine-Iridium, ayant un diamètre de 10 microns.

Courbe d'étalonnage du thermomètre à résistance par intermédiaire d'un four électrique

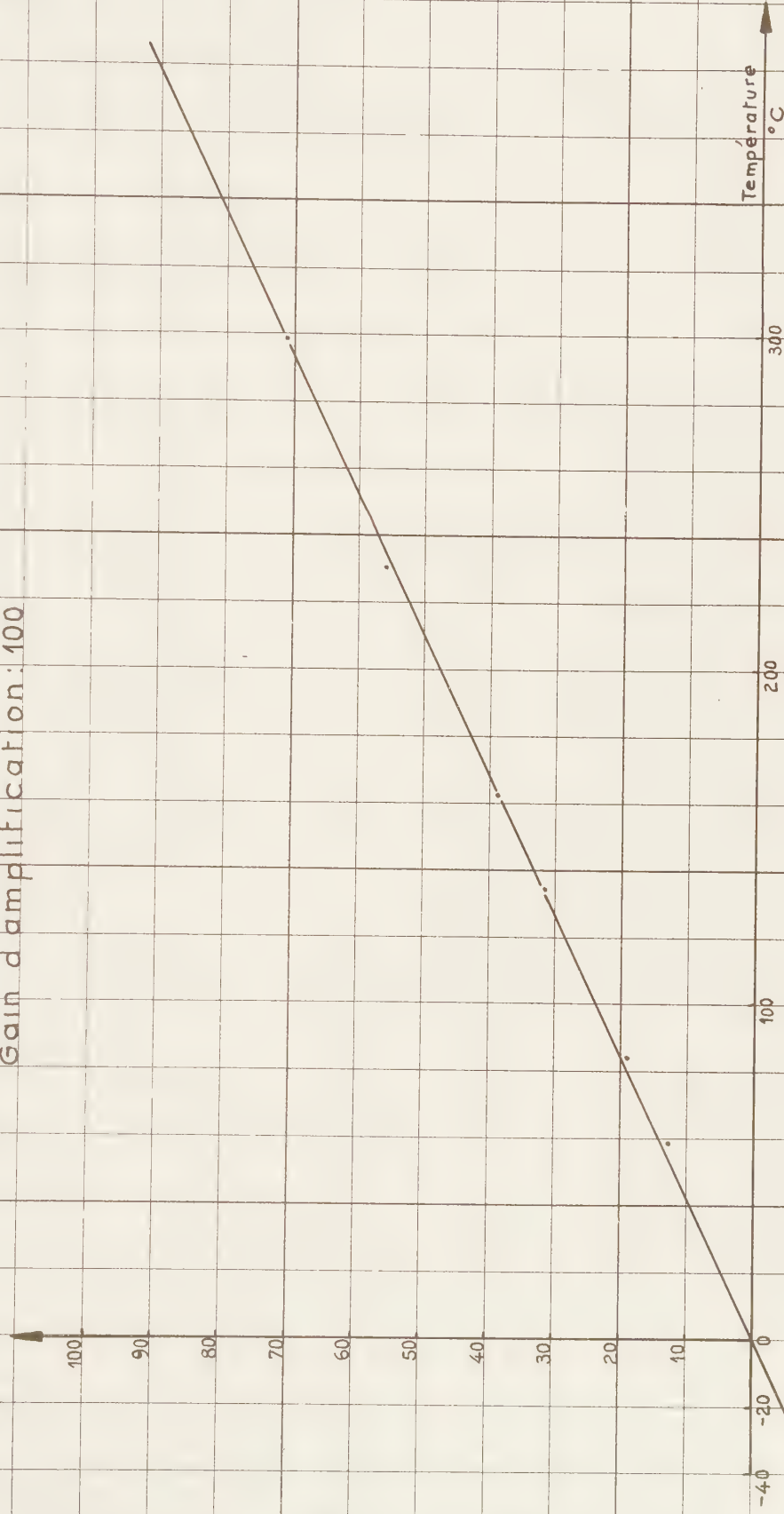
13

Résistance du filament à 20°C: 6,41 Ω

Résistance du support à 20°C: 3,69 Ω

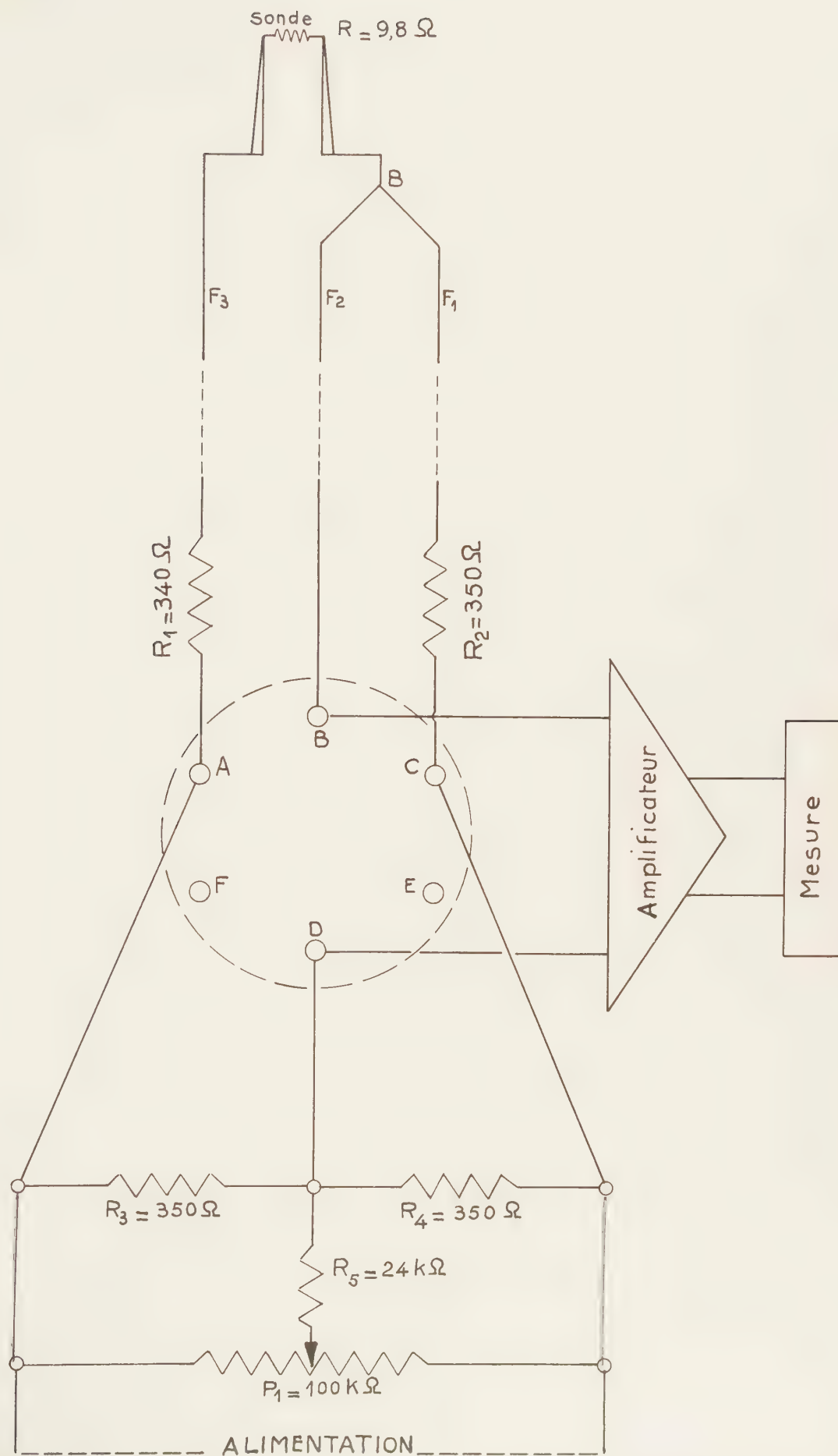
Résistance totale à 20°C: 9,80 Ω

Gain d'amplification: 100



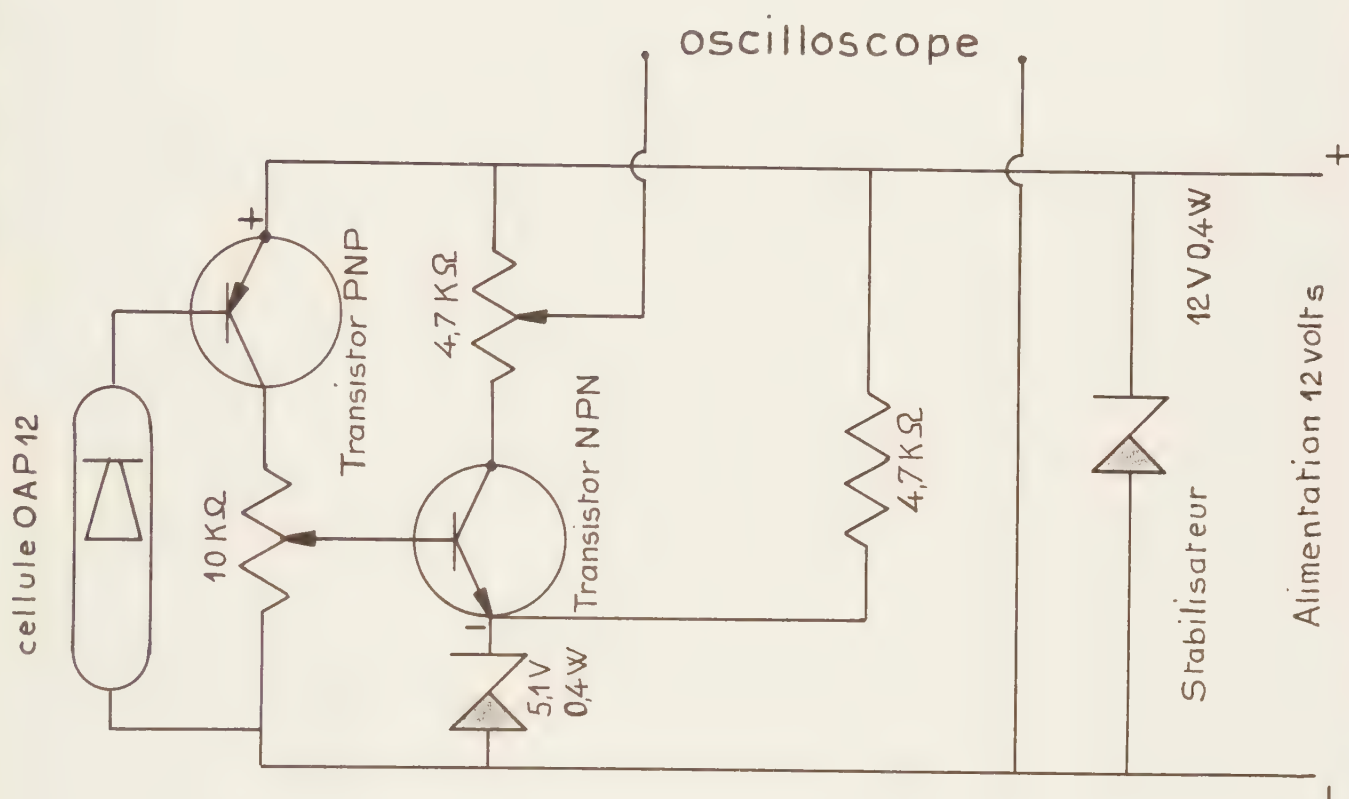
SCHEMA du montage de thermomètre à résistance
dans une branche du pont de Wheatstone par
intermédiaire de 3 fils de raccordement

14

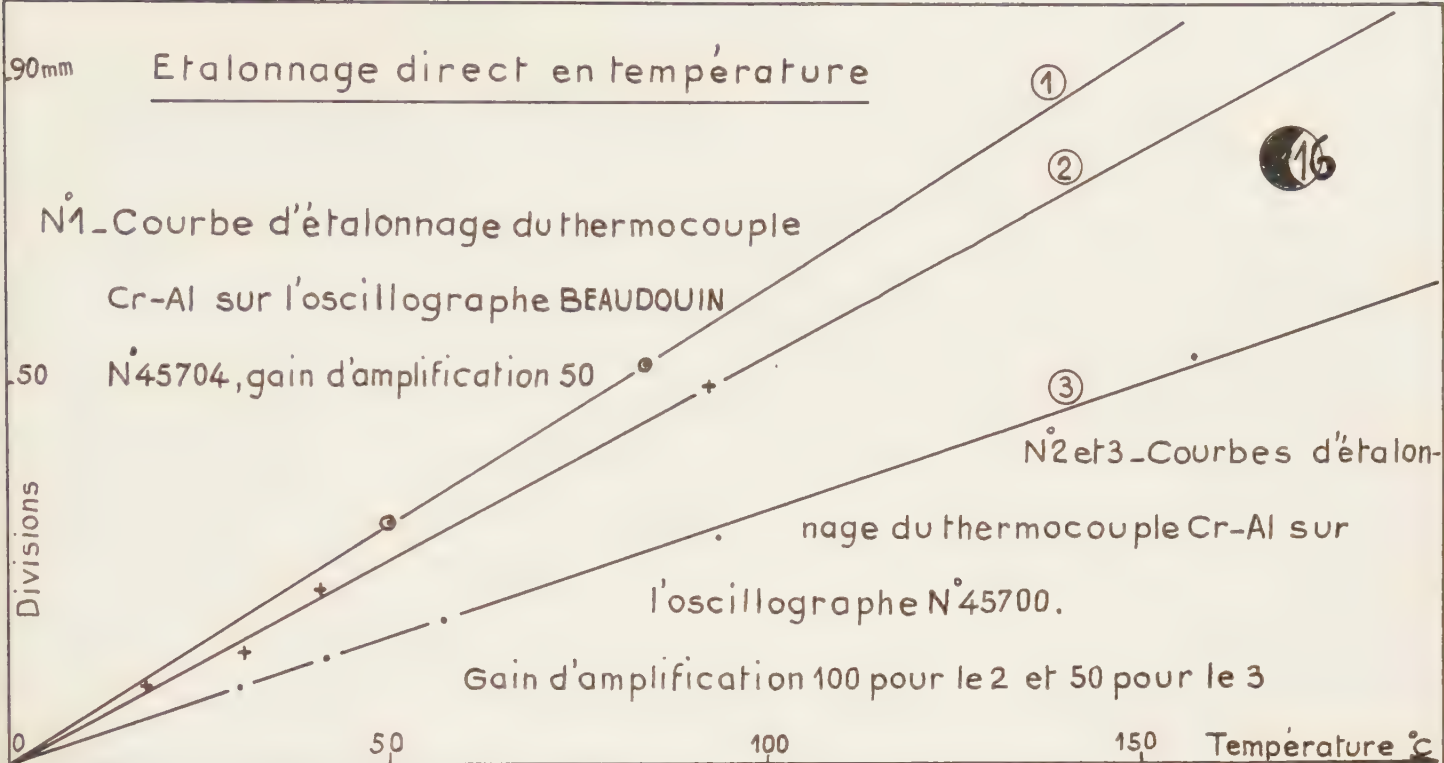


Circuit amplificateur des signaux de marquage des angles de rotation

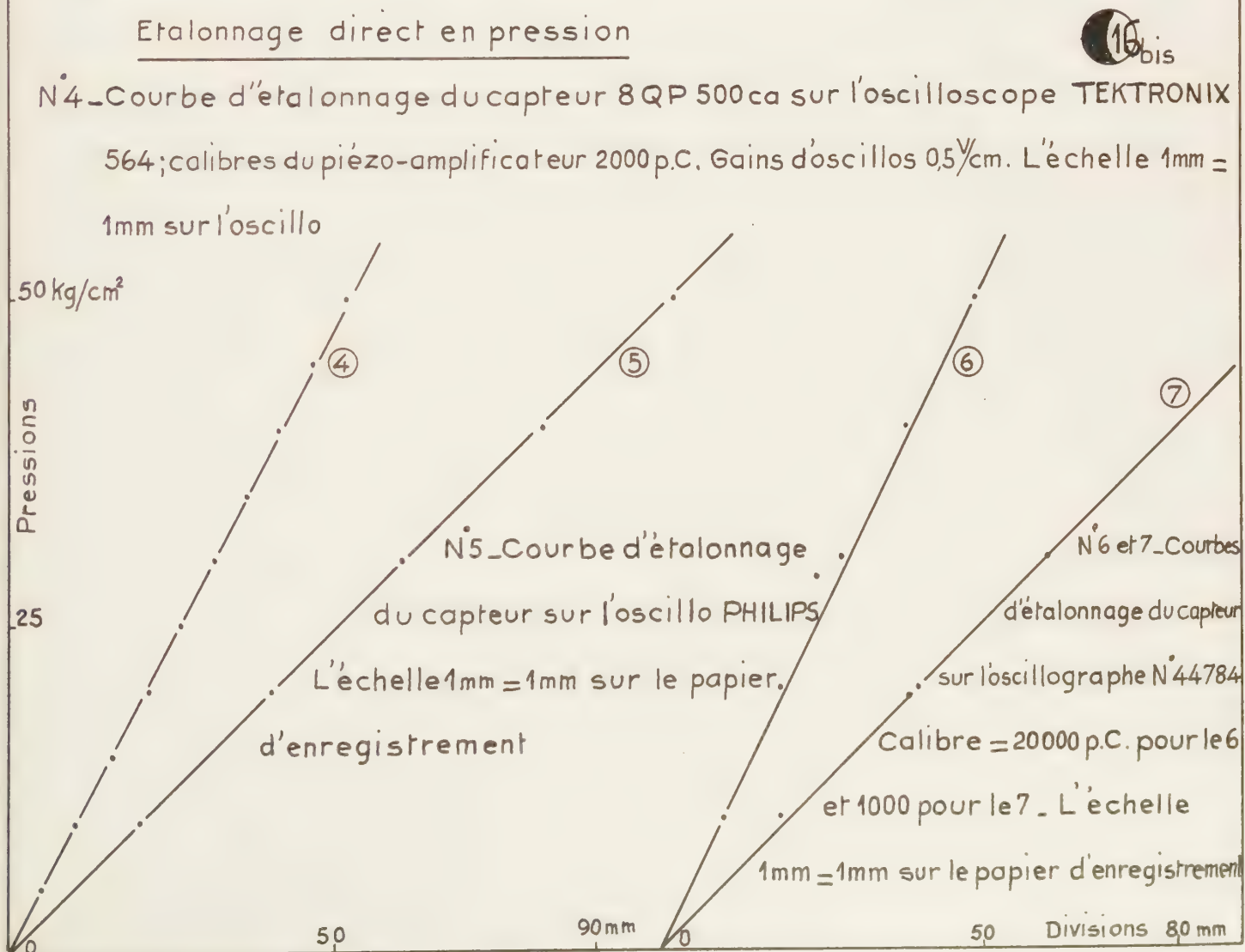
15



Etalonnage direct en température



Etalonnage direct en pression



1.3.2.1.- Perçage de la culasse

Le diamètre de filtage du presse-étoupe du thermomètre ainsi constitué est important (20 mm environ) et d'autre part la culasse ayant les soupapes en tête est encombrée et ne se prêtait pas facilement à l'adjonction du thermomètre ; nous avons pu le positionner non sans difficulté dans une position inclinée (fig. 10 et 11).

1.3.2.2.- Étalonnage des capteurs

- A.- Le capteur de pression est étalonné au moyen d'un manomètre de précision à l'huile (fig. 16 bis).
- B.- Chaque thermo-couple est mis dans un bain thermostatique avec un thermomètre à mercure tout près l'un de l'autre et est étalonné directement en température (fig. 16).
- C.- L'étalonnage du thermomètre à résistance est assez délicat. On peut dire que sa précision est limitée par celle de l'étalonnage.

Nous avons utilisé un four électrique. Un thermocouple chromel-Alumal était d'abord placé dans le four pour qu'il se stabilise à la température d'équilibre et ensuite le thermomètre à résistance était introduit près de ce thermocouple ; le temps de réponse du thermomètre à résistance étant faible il suffit de quelques secondes pour qu'il prenne la température de l'endroit considéré, sans que les supports du fil soient chauffés considérablement (le coefficient de température des supports est très faible).

Nous avons étalonné notre thermomètre directement en température en comparant avec les indications fournies par le thermo-couple puisque disposant de la table de température en fonction de la tension fournie.

Naturellement le thermomètre à résistance était placé dans une branche du pont WHEATSTONE ; le pont est équilibré à la température ambiante connue et la correction d'origine est faite au moment du dépouillement des résultats (fig. 13).

1.3.2.3.- Montage en pont Wheatstone du thermomètre à résistance

Nous avons utilisé le pont d'extensométrie T.S.105, fabrication SEDEME ; nous l'avons alimenté par deux batteries de 12 Volts pour lui fournir une tension d'alimentation constante et avons choisi la tension minimum d'un Volt pour alimenter le pont, pour que l'intensité parcourue de la branche du pont contenant la sonde, ne dépasse pas 2mA afin de pouvoir négliger l'effet Joule.

Les valeurs de la résistance des branches du pont étant de 350 Ω , nous étions obligés d'ajuster la valeur de notre sonde (9,8 Ω résistance des supports comprise) avec une résistance d'environ 340 Ω .

Pour compenser la variation de la résistance des fils de raccordement, nous avons fait un montage en trois fils de raccordement (fig. 14). L'avantage d'utilisation de ce pont est dans son alimentation stabilisée, son gain d'amplification (2000) et sa possibilité d'équilibrage. Son inconvénient majeur est son utilisation prévue pour les jauges de 350 Ω alors que la résistance active de notre sonde est de 6,11 Ω à 20°C ; ce qui donne une faible variation relative de résistance.

Le choix d'un gain d'amplification de 100, en considérant la sensibilité et la plage du galvanomètre inscripteur a nettement diminué cet inconvénient.

1.3.3.- Marquage des signaux correspondant aux angles de rotation

Pour repérer la position des courbes enregistrées par rapport aux angles de rotation, on dispose d'un disque ayant sur son périmètre des trous éloignés de 10° et seulement deux trous de 5° de part et d'autre du trou correspondant au P.M.H. fixé sur l'axe du moteur. La lumière d'une lame est projetée par les trous sur une cellule photoélectrique ; le signal correspondant après amplification est envoyé dans un enregistreur (fig. 15).

1.4.- CONTROLE DE DEROULEMENT DES OPERATIONS DANS LA CHAMBRE FROIDE

La dynamo tachymétrique fixée sur l'axe du moteur est branchée à l'extérieur sur l'oscilloscope TEKTRONIX 564 à mémoire ; sur son écran la vitesse instantanée du moteur est enregistrée et par là, la marche, l'arrêt et la vitesse du moteur sont également contrôlés.

1.5.- ENREGISTREMENTS

Nous avons utilisé l'enregistreur à inscription directe BEAUDOUIN, type A.0.300. Les inscripteurs montés sur cet enregistreur sont des galvanomètres à aimants mobiles ; les rayons lumineux produits par une lampe ultra-violet sont réfléchis sur leurs miroirs et impressionnent directement le papier d'enregistrement. Nous disposons des inscripteurs dont les fréquences propres étaient de 40, 80, 450 et 1000 Hz ; les tensions maximum admises étaient en ordre de 0,004, 0,2, 6 et 60 Volts. Cet enregistreur dispose de vitesses de déroulement du papier étiquées de 1cm/mn à 60m/mn et de deux séries de bases de temps ($\frac{1}{100}$, $\frac{1}{10}$ sec) et (1,10 sec).

La largeur du papier d'enregistrement étant de 152 mm, nous avons porté tous les enregistrements cités ci-après sur ce papier :

- marquage des angles de rotation
- pression
- voltage aux bornes du démarreur
- intensité du courant au démarreur
- vitesse instantanée du moteur
- température de compression de l'air
- température de l'huile
- température de la paroi

Nous avons enregistré aussi la pression en fonction des angles de rotation et du temps au moyen d'un oscilloscope PHILIPS et d'une caméra enregistreuse à déroulement continu TELEC E 65.

1.6.- AMPLIFICATIONS

- A.- Nous avons utilisé le pont d'extensométrie T.S.105 de fabrication SEDEME pour détecter et amplifier la variation subie par le thermomètre à résistance. Cet appareil dispose d'un gain d'amplification de 0 à 2000.
- B.- Le capteur de pression dispose d'un pré-amplificateur type TA-2/C et d'une chaîne d'alimentation type TP-220/A.
- C.- Des amplificateurs ROCHAR à courant continu type A.1338 sont utilisés pour amplifier le courant produit par les thermocouples en vue d'enregistrement des températures. Ces appareils disposent d'un gain d'amplification de 20 à 1000.

II.- EXECUTION DES EXPERIENCES

Les expériences comportent deux phases :

- 1.- Le moteur diesel est entraîné avec son démarreur ;
- 2.- Le moteur diesel est entraîné avec le montage fait par le moteur électrique.

2.1.- LE MOTEUR DIESEL ENTRAINÉ PAR LE DEMARREUR

Caractéristiques du démarreur équipant le moteur diesel :

Type DUCELLIER 6168

Tension d'alimentation 12 V.

Couple maximal 2,5 m.kg

Intensité absorbée par ce couple 660 A

Puissance maximale 2,2 ch

Lanceur, nombre de dents : 10

Rapport des rayons : $\frac{\text{couronne du moteur}}{\text{lanceur}} \approx 10$

Deux batteries de 12 Volts en parallèle se trouvent dans la chambre froide, sont branchées sur le démarreur ; le contact était fait de l'extérieur à l'aide d'un relais électrique et d'un interrupteur manuel ; l'intensité du courant était mesurée par l'intermédiaire d'un shunt ($603 \mu\Omega$) branché sur un oscillographe de 650Ω de résistance interne ; les bornes des batteries et du démarreur étaient branchées en série avec des résistances de charge convenable sur les oscillographes. Ces oscillographes étaient étalonnés en intensité et en voltage dans ces conditions. Les courbes d'étalonnage et les courbes caractéristiques du démarreur déterminent le couple, la tension aux bornes du démarreur et des batteries ; les batteries étaient branchées sur un chargeur pendant la nuit.

2.1.1.- Méthode de l'expérience

La température de la chambre froide était réglée par un appareil enregistreur et régulateur MECI, branché sur l'installation frigorifique. On disposait de 18 heures environs pour laisser la chambre froide atteindre son équilibre thermique. Les expériences étaient exécutées au milieu de la journée, les températures d'équilibre étaient de :

0, -5, -10, -15, -20, -25, -30, -35, -40°C

Le combustible utilisé pendant toute la durée des expériences était le fuel oil domestique ; et la viscosité de l'huile de graissage utilisée était de SAE 5 W ; la figure 17 représente la variation de la viscosité de cette huile en fonction de la température.

Le circuit réunissant la batterie et le démarreur avait un double point de contact ou d'interruption : l'un par la voie d'un relais électrique pour l'arrêt automatique et l'autre par un interrupteur manuel. L'arrêt de l'injection aussi était doublé par un relais temporisé et un bouton manuel ; une poignée transportable (fig. 9) contenait les deux interrupteurs cités et les boutons de marche et d'arrêt des relais électriques ; le contrôle de la marche était assuré par l'oscilloscope "TEKTRONIX" ; la durée de contact était de 30 secondes ; trois tentatives étaient faites pour chaque essai ; le délai entre chaque tentative était parfois de 5 minutes ou parfois de 2 heures ; les délais courts entre les tentatives avantaient le démarrage surtout au point de vue du dégomme de l'huile.

Dans cette phase d'expérience nous avons enregistré de plus les angles de rotation, la pression, la température dans la chambre de combustion au moyen d'un thermocouple.

2.2.- MOTEUR DIESEL ENTRAINE AU MOYEN DU MONTAGE AVEC LE MOTEUR ELECTRIQUE

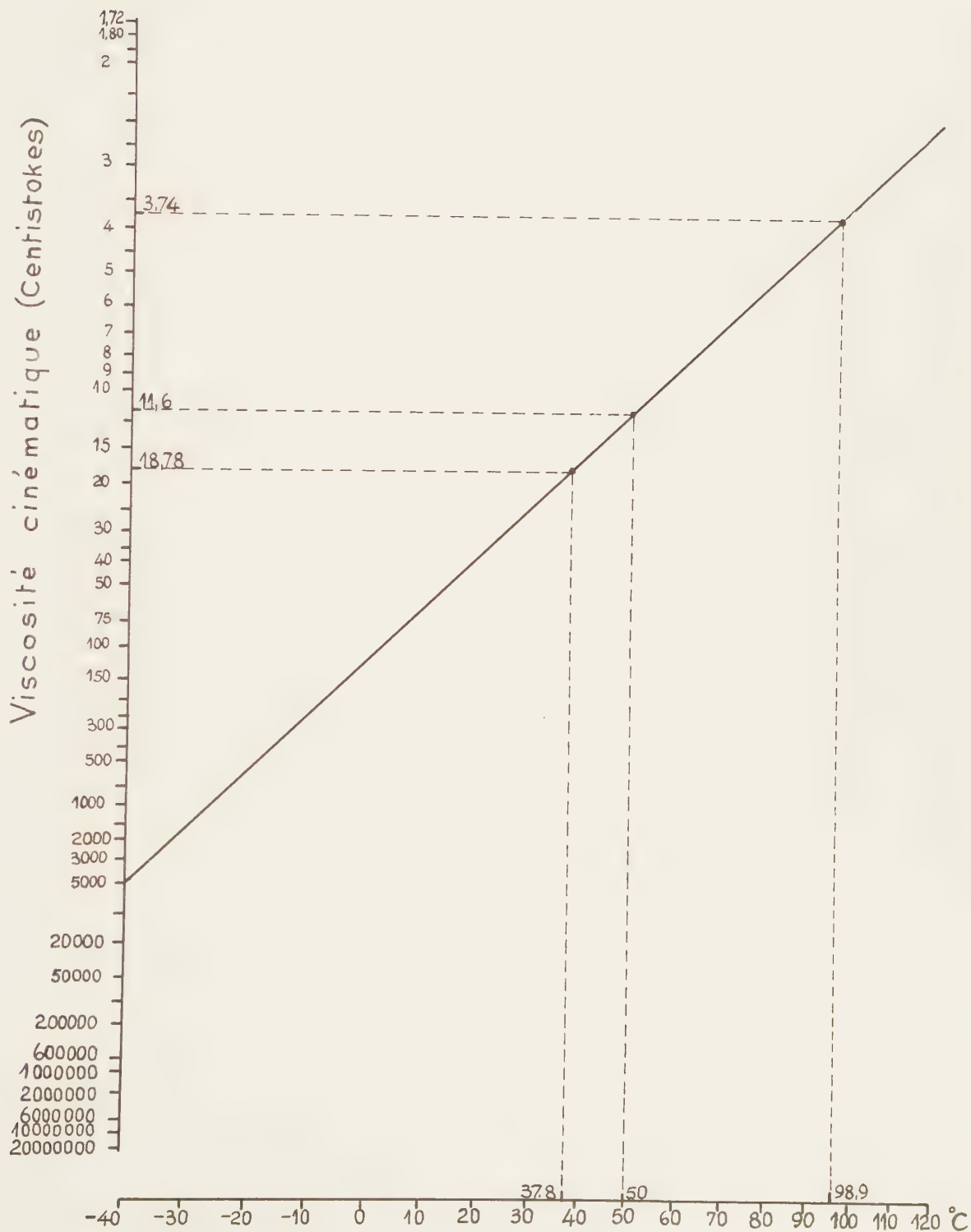
Il ne nous était pas possible d'enregistrer le couple dans cette expérience ; l'expérience avec le démarreur a déterminé le couple nécessaire pour entraîner le moteur diesel dans les différentes températures ; l'inertie et la résistance des boîtes de vitesse suggèrent un couple plus important ; le moteur électrique produit un couple de 2,5 m.kg à 2850 tr/mn ; ce couple est multiplié par les rapports choisis, donnant des vitesses de 150, 500, 600, 900 et 1200 tr/mn au moteur diesel ; c'est-à-dire de 47,5, 14, 12, 8 et 6 m.kg ; mais ces couples sont minorés par le couple résistant des deux boîtes de vitesse, ce dernier étant croissant aux basses températures. L'huile utilisée dans les boîtes de vitesse est la même que celle utilisée dans le moteur diesel ; malgré sa faible viscosité, la figure 17 représente son augmentation rapide aux basses températures d'où l'accroissement rapide du couple résistant qui rend impossible l'entraînement du moteur.

Nous étions alors amenés avant chaque mise en route de faire passer la position du P.M.H. pour pouvoir amorcer l'entraînement et donner une vitesse à l'arbre tournant avant le temps de compression ; à ce dernier moment, l'énergie emmagasinée dans les volants d'inertie aidait à vaincre la résistance de compression.

De ce qui vient d'être dit, on comprend l'utilité de décompresseur sur le moteur diesel, pour faciliter le lancement et le dégomme du moteur.

Viscosité de l'huile SAE 5W en fonction de la température

17



Les expériences avec le démarreur ont montré que le fuel s'épaississait en fonction de la baisse de température ; l'écoulement et la pulvérisation devenaient impossibles ; pour cette raison, nous l'avons remplacé par un gas oil arctique, pour améliorer l'écoulement bien que son point d'inflammation soit supérieur à celui du fuel.

2.2.1. - La méthode des expériences

Les températures choisies sont : de la température ambiante, 0, -5, -10, -15, -20, -25, -30, et -35°C. Trois vitesses de 150, 600 et 900 tr/mn sont retenues pour pouvoir aisément comparer l'effet de basse, moyenne et grande vitesse sur le démarrage ; à partir de température inférieure à 0°C, l'apparition de la flamme dans le cylindre était impossible lorsque le moteur était entraîné avec la basse vitesse ; en conséquence nous l'avons remplacée avec une vitesse de 500 tr/mn.

A ce moment de l'expérimentation, nous avons pu disposer le thermomètre à résistance ; pour protéger notre unique thermomètre, nous avons exécuté les expériences sans injection du combustible ; et après, nous les avons répétées avec injection du combustible ; naturellement dans les deux cas les conditions du couple et de la vitesse changent ; quoi qu'il en soit, nous n'aurions pas d'autre choix à faire.

Le moteur électrique et les appareils enregistreurs étaient mis en route par un bouton de marche ; à part la possibilité d'arrêt automatique, le bouton d'arrêt total et le bouton d'arrêt de l'injection permettaient l'intervention manuelle à chaque moment voulu, et la situation de marche était contrôlée sur l'écran de l'oscilloscope "TEKTRONIX". L'intervalle des essais pour chaque vitesse était de 2 heures en vue d'assurer les conditions identiques pour chacune d'elles ; la durée maximum d'entraînement était fixée à une minute.

Dans cette phase nous avons enregistré les angles de rotation, la pression, la température dans la chambre de combustion, la vitesse instantanée du moteur et les températures de l'huile et de la paroi.

2.2.2.- Caractéristiques des combustibles utilisés

Pour l'expérience avec le démarreur, le combustible utilisé était du fuel oil domestique ; des troubles constatés dans l'écoulement et pulvérisation, nous a amené à utiliser pour la deuxième phase des expériences un gas oil arctique ; le tableau ci-après montre que le point de trouble de ce gas oil est très loin des températures essayées, mais par contre son point d'inflammation est supérieur, comme l'ont montré les expériences.

Type du com- busti- ble	Masse volumi- que à 20°C kg/lit.	Visco- sité ciné- matique à 20°C CSt	Diesel index	Point trouble et point d'écou- lement °C	Point éclair Vase ouvert °C	Point éclair Vase clot °C	Pouvoir calori- fique supé- rieur cal/g	Pouvoir calori- fique infé- rieur cal/g	Hydro- gène en %
Fuel oil domes- tique	0,827	3,57	51	-10/-15	59	58	10940	10190	13
Gas oil arcti- que Shell S6662	0,845	4,35	56	-63	98	65	11150	10262	13,9

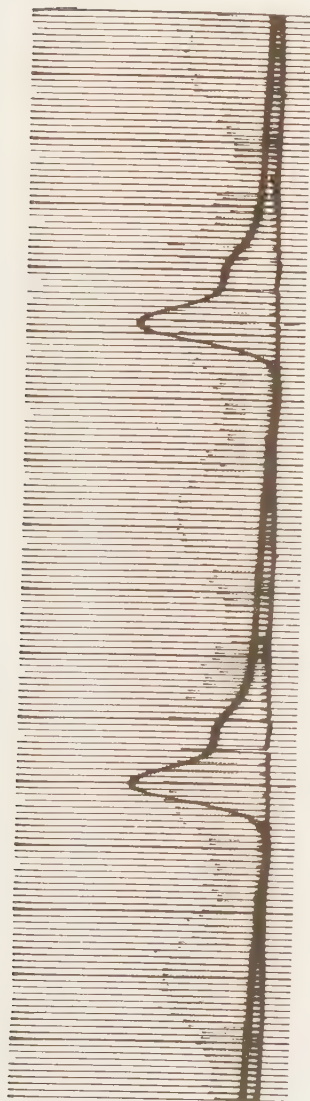


Fig 18 - Démonstration de deux déformations de la courbe de pression et leurs disparitions en fonction de la vitesse de rotation

a) Pression en fonction des angles de rotation et du temps V_r 160 tr/mm



b) Pression et la vitesse instantanée en fonction du temps

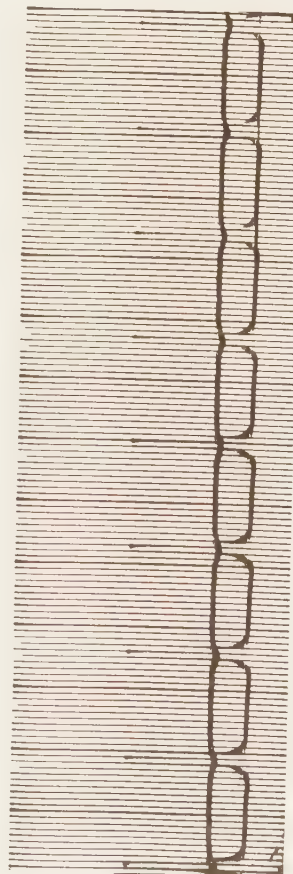
c) Pression et la vitesse instantanée en fonction du temps V_r 700 tr/mm

REMARQUES :

· On voit la disparition de deux déformations et la tendance à la régularité de la vitesse lorsque la vitesse de rotation augmente.

· Les numéros 1 et 2 sur la figure (b) présentent en ordre, l'origine de la pression et de la vitesse instantanée.

· Le piezo-amplificateur du capteur est toujours en position dynamique.



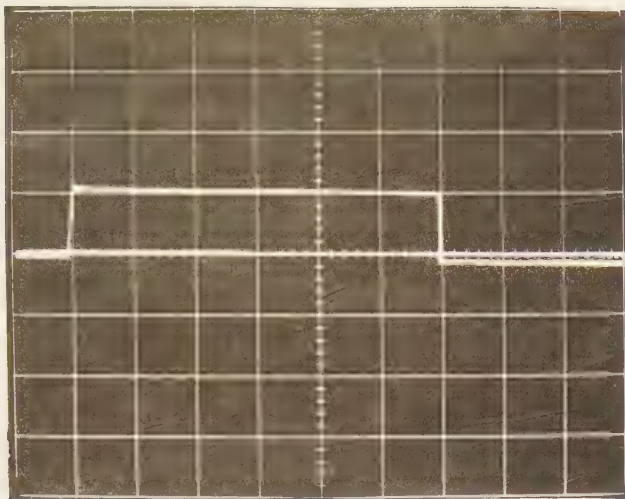


Fig 19a - Piezo-amplificateur en position statique, une pression constante appliquée au capteur est maintenue pendant 30 secondes ; on aperçoit une décharge négligeable

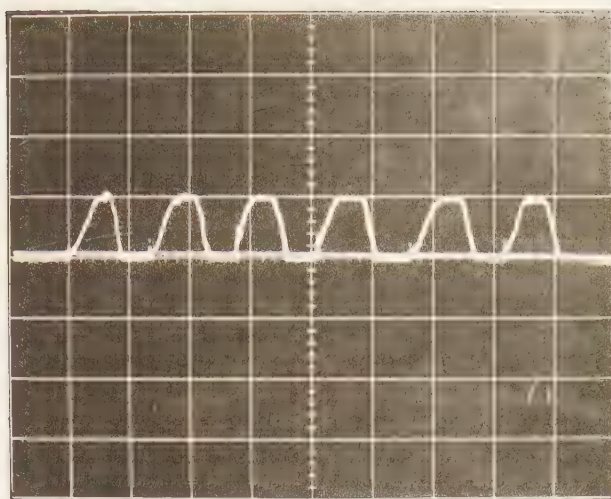


Fig 19b - Piezo-amplificateur en position statique, une pression périodique lente appliquée au capteur, présente une variation périodique se trouvant toujours au-dessus de l'origine.

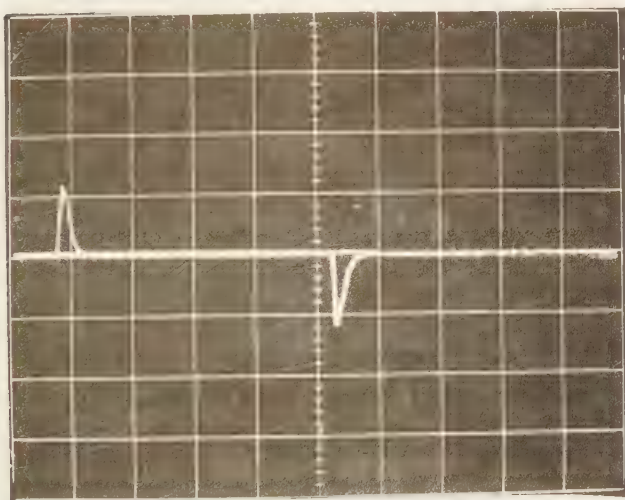


Fig 19c - Piezo-amplificateur en position dynamique, une pression constante appliquée et maintenue sur le capteur, après un instant présente une valeur nulle. (décharge automatique et tombé du spot sur l'origine). La suppression de la pression ; produit un signal négatif qui de suite revient sur l'origine.

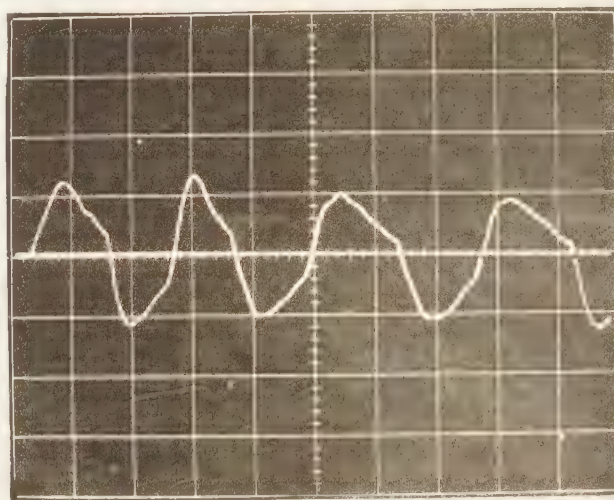


Fig 19d - Piezo-amplificateur en position dynamique, une pression périodique lente appliquée au capteur, produit des signaux périodiques ayant l'origine comme l'axe de symétrie.

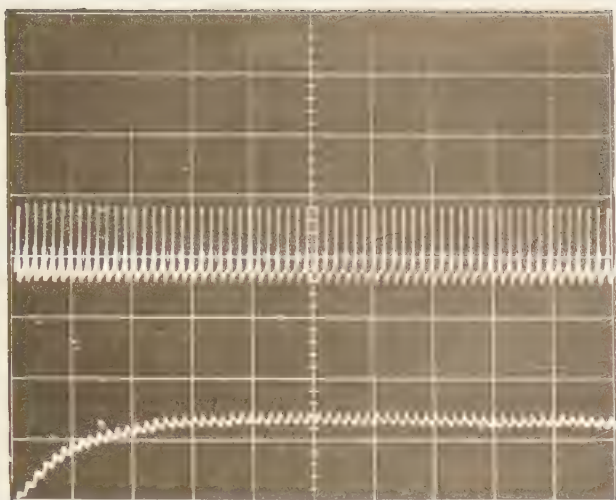


Fig 20a - La courbe au-dessus présente la pression du moteur diesel entraîné par le moteur électrique, sans injection du combustible, à une vitesse d'environ de 150 tr/mn . 1 mm = 2 kg/cm².

La courbe en dessous est la température à la chambre de combustion, enregistrée par intermédiaire d'un thermo-couple gainé d'un millimètre de diamètre

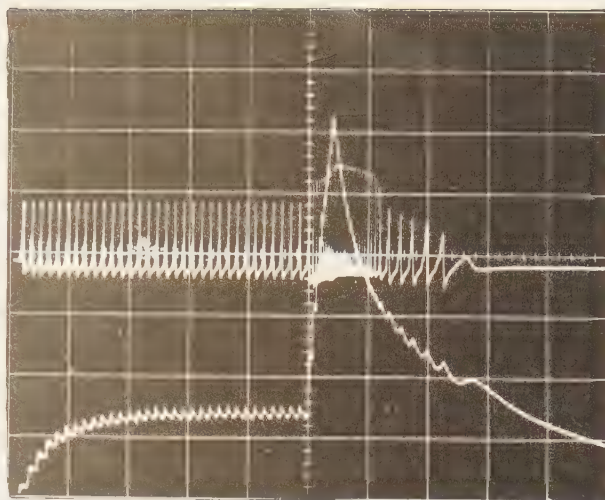


Fig 20b - Expérience en (a) avec injection du combustible ; démarrage après 25 secondes (1 cm = 5 sec) ; injection coupée après 2 secondes de fonctionnement. L'échelle pour la température moyenne est de 5°C/mm.

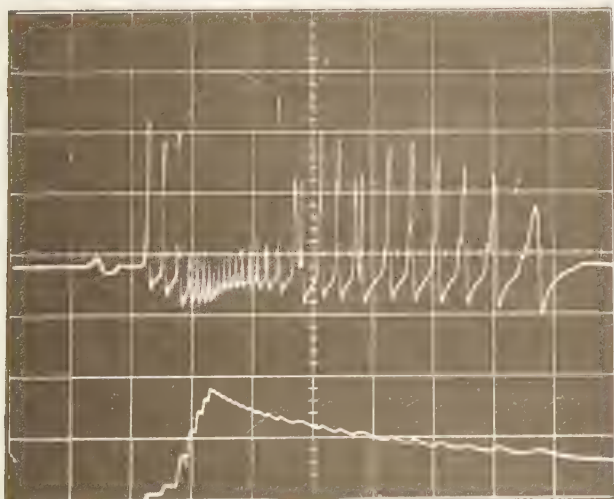


Fig 20c - Piezo-amplificateur toujours en position dynamique. Le moteur est entraîné avec une vitesse de 250 tr/mn ; 1 cm de l'axe horizontal représente 2 secondes. Dans toutes ces expériences on remarque :
 . la déformation de la courbe due à la basse vitesse et à la position dynamique du piezo-amplificateur
 . l'inertie du thermo-couple.

D.- LES RESULTATS DES EXPERIENCES

I.- LES ANOMALIES RENCONTREES AU COURS DES EXPERIENCES

Dans un enregistrement préliminaire, deux déformations étaient apparues sur la courbe de pression ; l'une était la formation d'un palier à mi-parcours de compression et l'autre était une descente à partir de la première détente au-dessous de l'origine (fig. 18). Avant d'avoir retrouver les causes de ces anomalies, l'étude et la mesure de la pression étaient impossibles.

1.1.- LA DEFORMATION DE LA COURBE DE PRESSION DUE AU CAPTEUR DE PRESSION

En position dynamique du piezo-amplificateur du capteur de pression, aux basses vitesses de rotation du moteur (jusqu'à environ 600 tr/mn), la courbe de pression à partir de la première détente représente une descente au-dessous de l'origine (fig. 18). La comparaison des positions statiques et dynamiques du piezo-amplificateur sous l'effet des pressions constantes et périodiques, a montré une décharge importante du capteur en position dynamique lorsque la vitesse de rotation était assez basse (fig. 19 et 20).

1.1.1.- Démonstration de la décharge et imprécision en position dynamique du piezo-amplificateur pour les basses vitesses

Un capteur à quartz est constitué d'une rondelle de quartz placée entre deux conducteurs.

Lorsqu'on comprime une telle rondelle on recueille sur les deux faces une charge proportionnelle à la pression (73) :

$$Q = KP$$

En réalité, on mesure la tension qui résulte de la charge du condensateur constitué par les deux armatures de la rondelle de quartz, les capacités d'entrée de l'électromètre et éventuellement un condensateur branché en parallèle sur la rondelle :

$$V = \frac{Q}{C} = \frac{K}{C} P$$

Considérons P comme un phénomène sinusoïdal ; sur les armatures du condensateur une variation sinusoïdale de la charge sera produite :

$$Q = Q_0 \sin \omega t$$

On peut appliquer la loi d'OHM au schéma équivalent correspondant dans ce cas (fig. 21) :

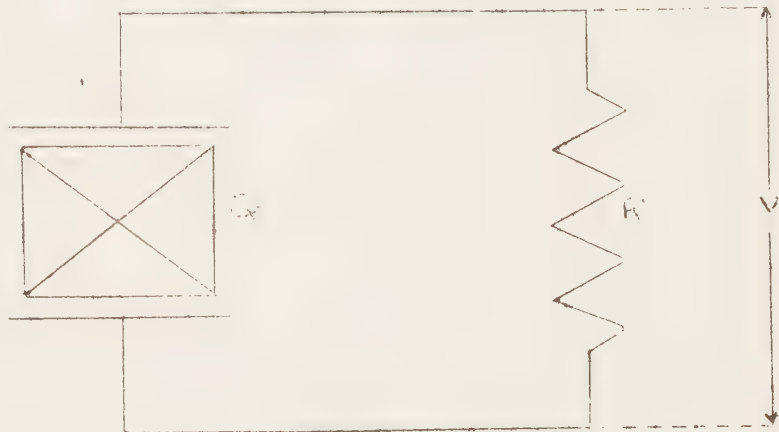


Fig. 21 - Circuit équivalent à un quartz soumis à un effort variable

$$R I + \frac{Q}{C} = \frac{Q}{C}$$

remplaçons :

$$I = \frac{dQ}{dt} \text{ et } Q = Q_0 \sin \omega t$$

$$RC \frac{dQ}{dt} + Q = Q_0 \sin \omega t \quad (1)$$

L'intégration de l'équation différentielle (1) après simplification et considération des conditions initiales donne :

$$V = \frac{V_0}{\sqrt{1 + \frac{1}{(RC\omega)^2}}} \sin (\omega t + \varphi) - \frac{V_0}{\frac{1}{RC\omega} + RC\omega} e^{-\frac{t}{RC}} \quad (2)$$

V est la tension résultante aux bornes de l'ensemble RC,
avec :

$$\varphi = \arctg \frac{1}{RC\omega}$$

La précision de la mesure de l'amplitude en fonction de la constante du temps RC, en pour cent est égale à :

$$\Delta V = \frac{V_0 - V_c}{V_0} = \left[1 - \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{1}{(RC\omega)^2}}} \right] \times 100$$

avec :

$$V_c = \frac{V_0}{\sqrt{1 + \frac{1}{(RC\omega)^2}}}$$

La précision de la mesure dépend donc du terme $\frac{1}{RC\omega}$, et elle augmente avec la valeur de $RC\omega$. Pour une constante de temps donnée de l'appareil, il est évident que la précision varie avec la valeur de ω , c'est-à-dire la précision diminue au fur et à mesure que la vitesse baisse.

Dans la position statique du piezo-amplificateur, la constante de temps RC est très grande, pour la valeur basse de ω aussi, $RC\omega$ reste grande et l'équation (2) prend la forme :

$$V = V_0 \sin \omega t$$

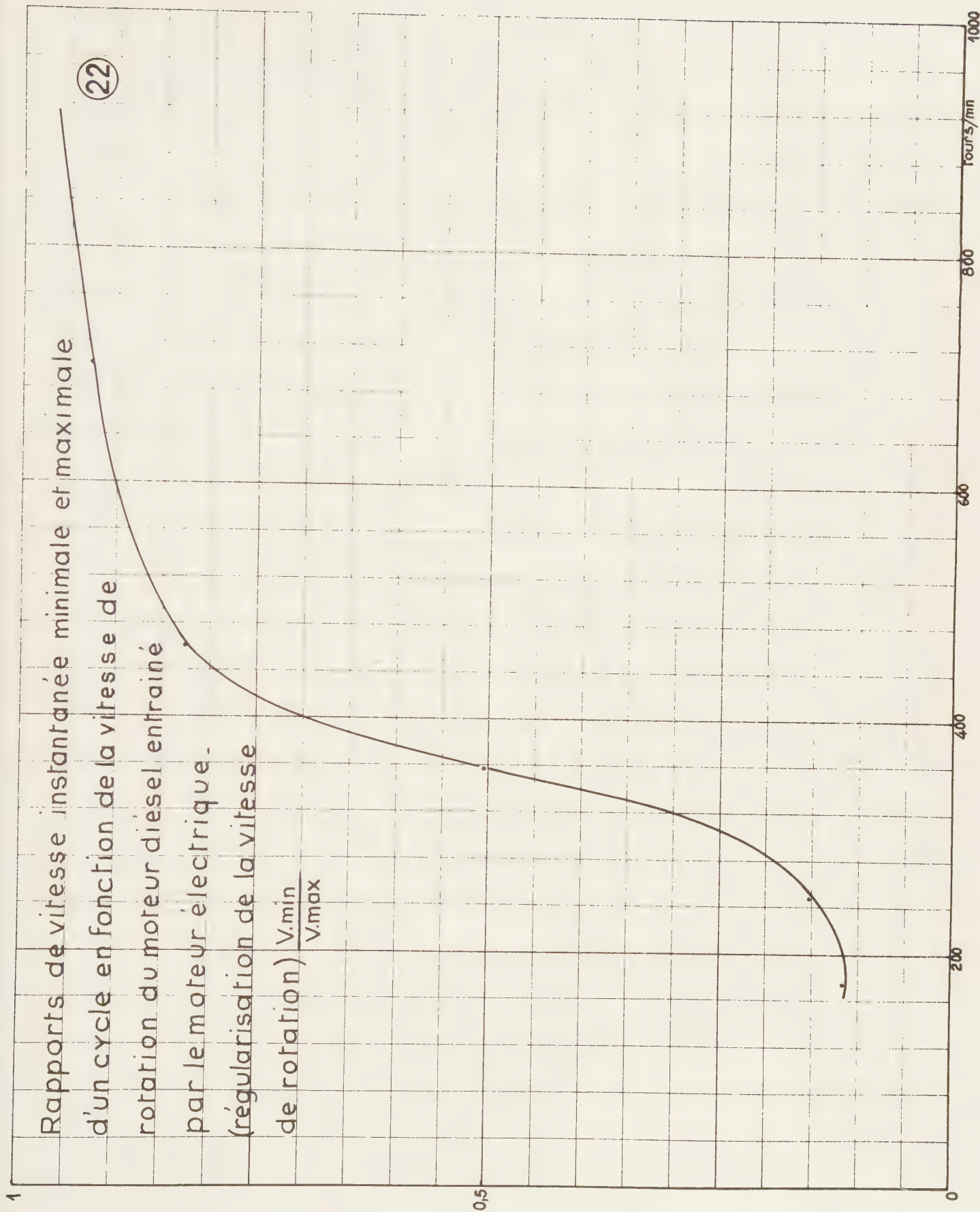
En utilisant la position statique du capteur la déformation de la courbe de pression a disparue ; dans cette position avant chaque essai nous avons appuyé sur le bouton du zéro de l'appareil pour annuler les charges accumulées.

1.1.2.- Ressemblance de la courbe déformée de pression avec la courbe dérivée lère de pression

Nous avons remarqué qu'en position dynamique du capteur, la constante de temps RC est petite ; pour les basses vitesses, la valeur de $RC\omega$ diminue et la courbe de pression représente une déformation ; ce cas rappelle celui d'un appareil utilisé pour l'enregistrement de la dérivée de pression. Dans cet appareil on choisit la

Rapports de vitesse instantanée minimale et maximale
d'un cycle en fonction de la vitesse de
rotation du moteur diesel entraîné
par le moteur électrique.
(régularisation de la vitesse
de rotation) $\frac{V_{min}}{V_{max}}$

22



constante de temps du circuit d'entrée de l'amplificateur faible, la tension appliquée sur la grille du tube d'entrée est proportionnelle à la dérivée première de la pression agissant sur le quartz.

1.2.- DEFORMATION DE LA COURBE DE PRESSION DUE AU MONTAGE MECANIQUE

L'enregistrement des pressions aux basses vitesses d'entraînement a présenté un palier à mi-parcours de compression (fig. 18). Au premier abord, l'origine de cette anomalie était inconnue ; on pourrait penser aux appareils, aux éléments du moteur, etc ... En observant la marche du moteur, nous avons remarqué un ralentissement du vilebrequin au passage de la compression. Cette observation nous a conduit à enregistrer la courbe de compression en même temps que la vitesse instantanée et les angles de rotation (fig. 18).

Les deux enregistrements ont montré une baisse de vitesse correspondant à cette partie.

On constate qu'à un point se trouvant 40° avant le P.M.H. le moteur est freiné, la vitesse instantanée diminuée. En augmentant la vitesse de rotation ce palier disparaît et également en changeant l'emplacement de la roue libre pour qu'elle reçoive des vitesses élevées.

Ces observations nous laissent à penser qu'un mauvais fonctionnement de la roue libre à rouleau aux basses vitesses, correspondant au temps de compression a créé une sorte de coincement qui freine à son tour le mouvement de rotation pour quelques instants. Ce coincement et ce ralentissement sont supprimés immédiatement par les à coups venant de la part des volants d'inertie.

En portant le rapport des vitesses maximales et minimales en ordonnée et le nombre de tours de rotation en abscisse, on obtient la figure n° 22 avec un point d'inflexion aux alentours de 300 tr/mn. On remarque sur cette courbe que l'irrégularité de la vitesse de rotation diminue avec l'augmentation de cette vitesse.

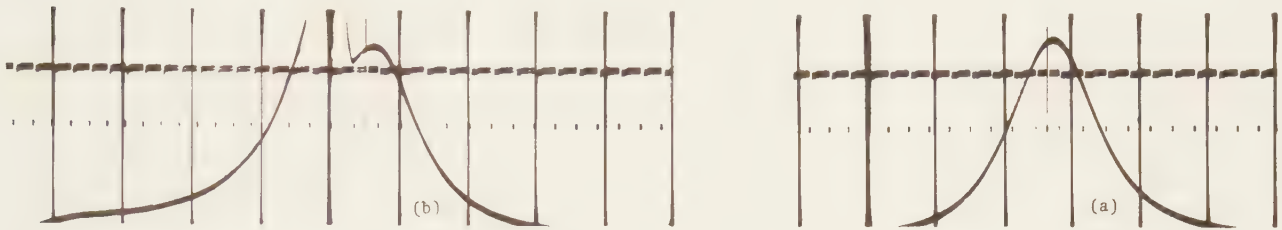
1.3.- DÉPHASAGE DES COURBES DE PRESSION ET DE TEMPÉRATURE PAR RAPPORT AU P.M.H. MECANIQUE

La figure 23 représente les courbes de pression en fonction des angles de rotation et du temps enregistrés au moyen de l'oscilloscope PHILIPS et la caméra TELEC, sur le moteur diesel entraîné aux vitesses différentes à la température ambiante (22°C).

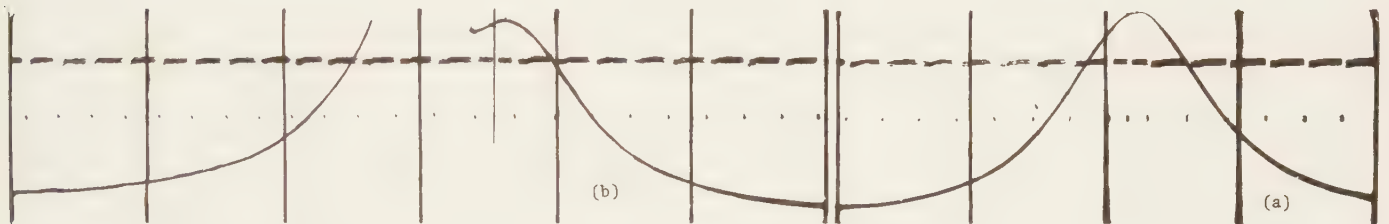
Les figures 39 et 43 représentent les enregistrements au moyen des galvanomètres oscillographiques (enregistreur ACB) ; la première à la température de 0°C et la seconde à la température $- 15^\circ\text{C}$. Nous avons porté les déphasages des maximum de pression et de température par rapport au P.M.H. mécanique dans le tableau suivant :



1. $v_1 = 150$ tr/mn; (a), 1er cycle ; (b) le début de démarrage après 50 secondes d'entraînement sans injection, et au moment de l'injection du combustible



2. $v_2 = 500$ tr/mn; (a) le 1er cycle; (b) le 13ème cycle et le début du démarrage



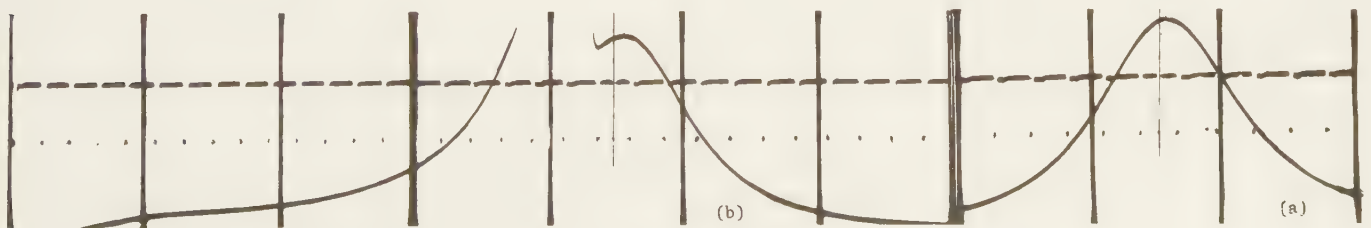
3. $v_3 = 600$ tr/mn; (a) le 1er cycle; (b) le 3ème cycle et le début du démarrage



Fig. 23 Pression en fonction des angles de rotation et du temps à la température ambiante (22°C); le moteur entraîné par le montage électrique avec les différentes vitesses; les vitesses indiquées correspondent au régime établi.

Les intervalles des traits verticaux présentent $\frac{1}{100}$ de seconde.

Echelle de la pression est la même pour toutes les courbes $1 \text{ mm} = 1,2 \text{ kg/cm}^2$



5. $v_5 = 1200$ tr/mn; (a) le 1er cycle; (b) le 3ème cycle et le début du démarrage

° des figures t tem- ératu- es °C	Vitesse de régime éta- blie et à la température ambiante tr/mn	N° des cycles	Vitesse de cha- que cy- cle tr/mn	Position du maximum de pression par rapport au P.M.H.		Position du maximum de température par rapport au P.M.H.	
				Degré vilebre- quin	Microse- conde	Degré Vilebre- quin	Microse- conde
3 2°C	V ₁ ≈ 150	1	122	- 3,5	4,1		
	V ₂ ≈ 500	1	176	- 2,7	1		
	V ₃ ≈ 600	1	197	- 2,1	0,64		
	V ₄ ≈ 900	13	779	- 1,5	0,31		
	V ₅ ≈ 1200	1	214	- 1,9	0,57		
9 °C	V ₅ ≈ 1200	1	142	- 3,75	8,5	- 8,75	21
		100	1122	+ 15	2,4	+ 15	2,4
3 15°C	V ₄ ≈ 900	1	226	- 6,9	1,4	- 10	15,9
		120	882	+ 11,5	2	+ 11,5	2

Il en ressort que :

- le maximum de pression se trouve avant le P.M.H. mécaniquement calé ;
- le maximum de pression s'approche du P.M.H. d'autant que la vitesse augmente ;
- le maximum de température aussi se trouve avant le P.M.H. ;
- aux basses vitesses le déphasage de température est plus grand que celui de pression ;
- aux grandes vitesses ces maximum sont confondus et ils dépassent le P.M.H.

1.3.1.- Interprétation

Le dernier résultat obtenu avec des galvanomètres enregistreurs est en contradiction avec celui du premier obtenu sur un oscilloscope ; on peut envisager l'hypothèse suivante :

. Les galvanomètres enregistreurs présentent un temps d'inertie pour les phénomènes rapides.

Il semble que cette hypothèse soit exacte ; en effet, la fréquence de réponse des galvanomètres utilisés est de 80 Hz maxi, ce qui peut être faible pour un phénomène assez rapide. Ces résultats sont donnés pour l'information, étant donné l'inertie mécanique des enregistreurs utilisés, il n'est pas possible de faire une étude précise du déphasage.

1.4.- LES PARASITES ELECTROMAGNETIQUES

Il existe de nombreux contacts et interruptions dans la marche de l'installation, comme la régulation et la commutation du MECI, la marche et l'arrêt du système frigorifique, du démarreur et du moteur électrique, etc ...

Ces appareils diffusent des ondes électromagnétiques qui sont captées par les circuits, amplifiées et superposées avec des phénomènes enregistrés. Ces enregistrements perturbés (Fig. 33) ne serviraient à rien si l'on ne pouvait pas supprimer les perturbations ; pour le faire, nous avons choisi des thermocouples, des câbles de compensation et des allonges blindées ; nous avons entouré le démarreur avec une cage en laiton et nous avons placé les amplificateurs et les appareils enregistreurs dans des cages FARADAY en aluminium ; tous ces efforts nous ont donné des résultats satisfaisants.

II.- RESULTATS DES EXPERIENCES AVEC LE DEMARREUR

2.1.- VARIATION DE LA VITESSE D'ENTRAINEMENT DU DEMARREUR EN FONCTION DU TEMPS POUR DES TEMPERATURES DIFFERENTES

L'huile SAE 5 W à faible viscosité utilisée a donné une vitesse élevée au moteur à la température ambiante. Cette vitesse a diminué au fur et à mesure que la température a baissé (fig.23 bis) de 0 à - 40°C, cette vitesse est tombée à la moitié ce qui est remarquable, avec le démarreur, c'est que la durée d'accélération est toujours courte et que la vitesse établie diminue si on continue l'entraînement. On peut attribuer le premier effet au couple important du départ et le deuxième à la diminution de la charge de batterie.

2.2.- VARIATION DE LA PRESSION EN FONCTION DE LA TEMPERATURE

L'abaissement de la température diminue la vitesse de rotation et par voie de conséquence la pression maximale. Mais au fur et à mesure que la température baisse, l'augmentation de la viscosité de l'huile et l'accumulation du combustible injecté, créent une bonne étanchéité et aussi une augmentation du taux de compression ; il en résulte que la pression augmente dans des proportions importantes (Tableau VI) ; naturellement dans le cas de très basse température et lorsque le combustible non pulvérisé est accumulé depuis des essais précédents.

2.3.- VARIATION DU TEMPS DE DEMARRAGE

Le temps de démarrage augmente quand la température baisse ; cette variation a une allure hyperbolique avec une asymptote aux alentours de - 15°C (fig. 32), c'est-à-dire qu'en injectant du fuel et sans aucune aide à partir des alentours de - 15°C, l'apparition des flammes dans le moteur cesse d'être possible ; tandis qu'à la température ambiante le démarrage était immédiat à partir du premier ou deuxième cycle. Comme nous l'avons signalé dans les chapitres précédents ; avec le montage utilisé, il est difficile de pouvoir distinguer le démarrage proprement dit, de l'apparition de la flamme, or pour pouvoir comparer l'effet des vitesses, nous nous sommes basés à comparer l'observation de l'apparition de la première flamme dans le cylindre du moteur entraîné.

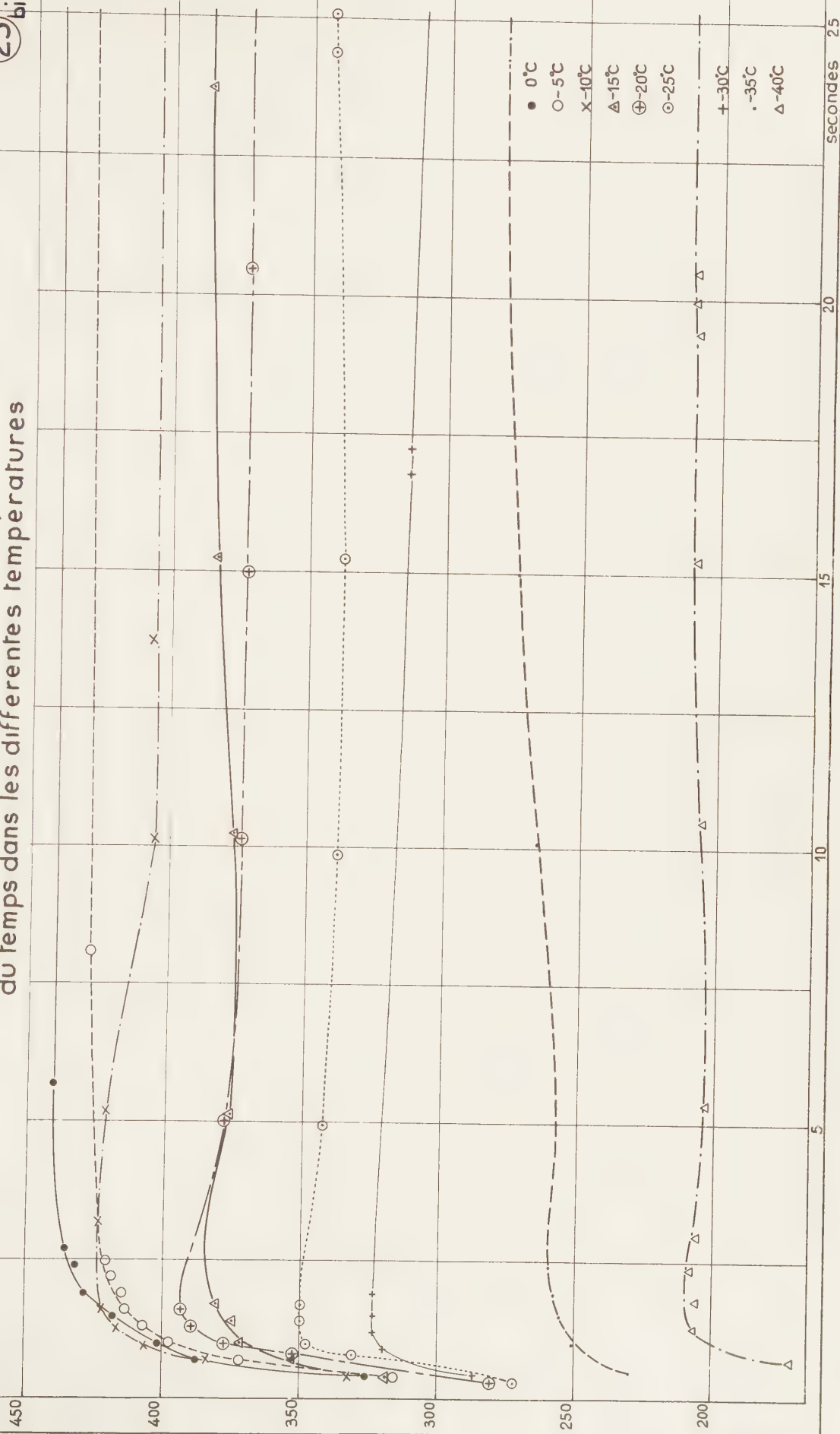
2.4.- VARIATION DU COUPLE RESISTANT EN FONCTION DE LA TEMPERATURE

Nous avons pu entraîner notre moteur jusqu'à la température - 40°C en branchant aux bornes du démarreur deux batteries de

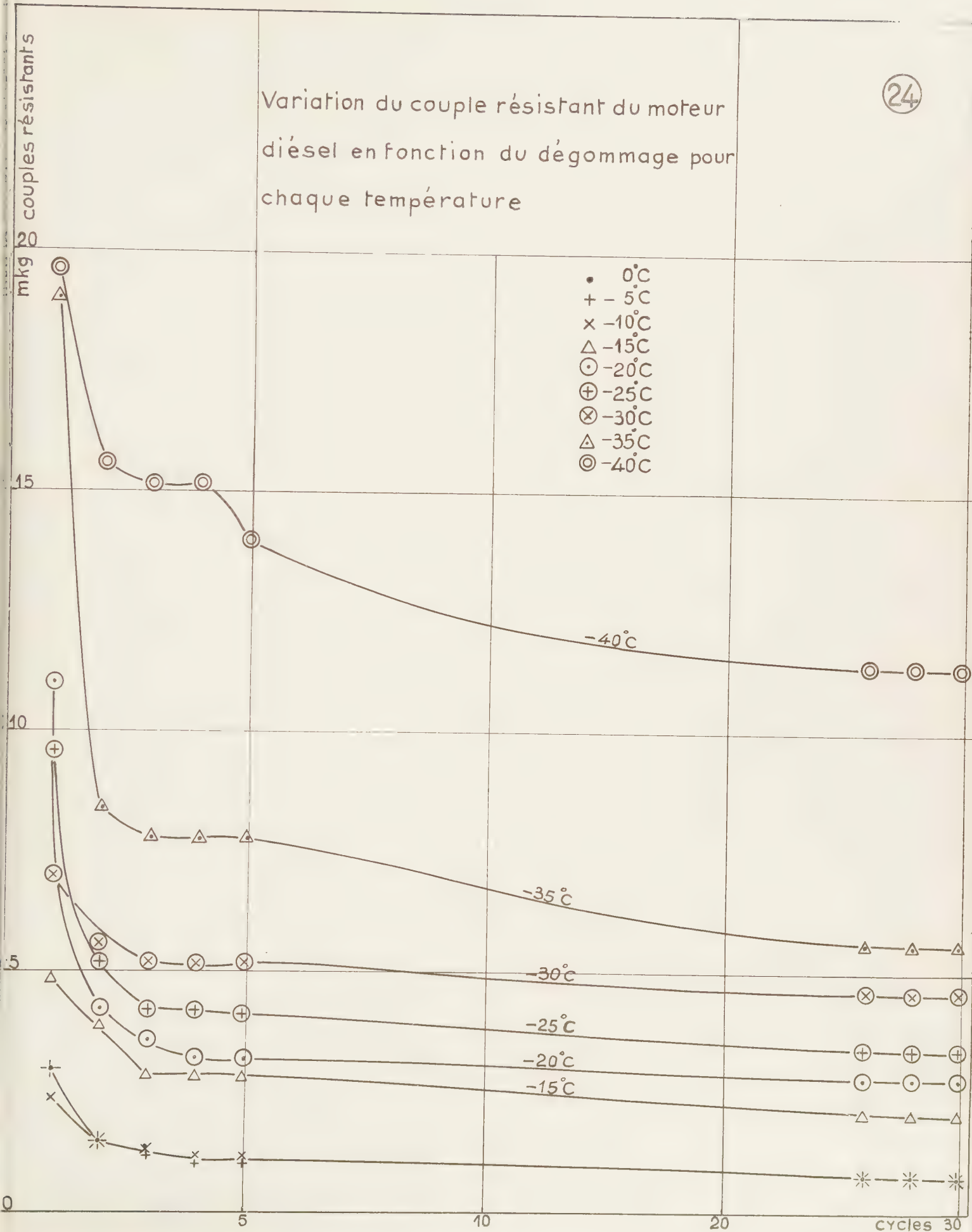
12 Volts en parallèle. Les batteries sont rechargées avant chaque essai. La figure 24 représente la variation du couple résistant en fonction des cycles dans chaque température. On en conclut que malgré une huile très fluide, le couple résistant augmente avec l'abaissement de la température. Ce couple résistant diminue en fonction du dégommeage de l'huile, mais il reste toujours supérieur tant que la température baisse (fig. 25).

Variation de la vitesse d'entrainement par le démarreur en fonction du temps dans les différentes températures

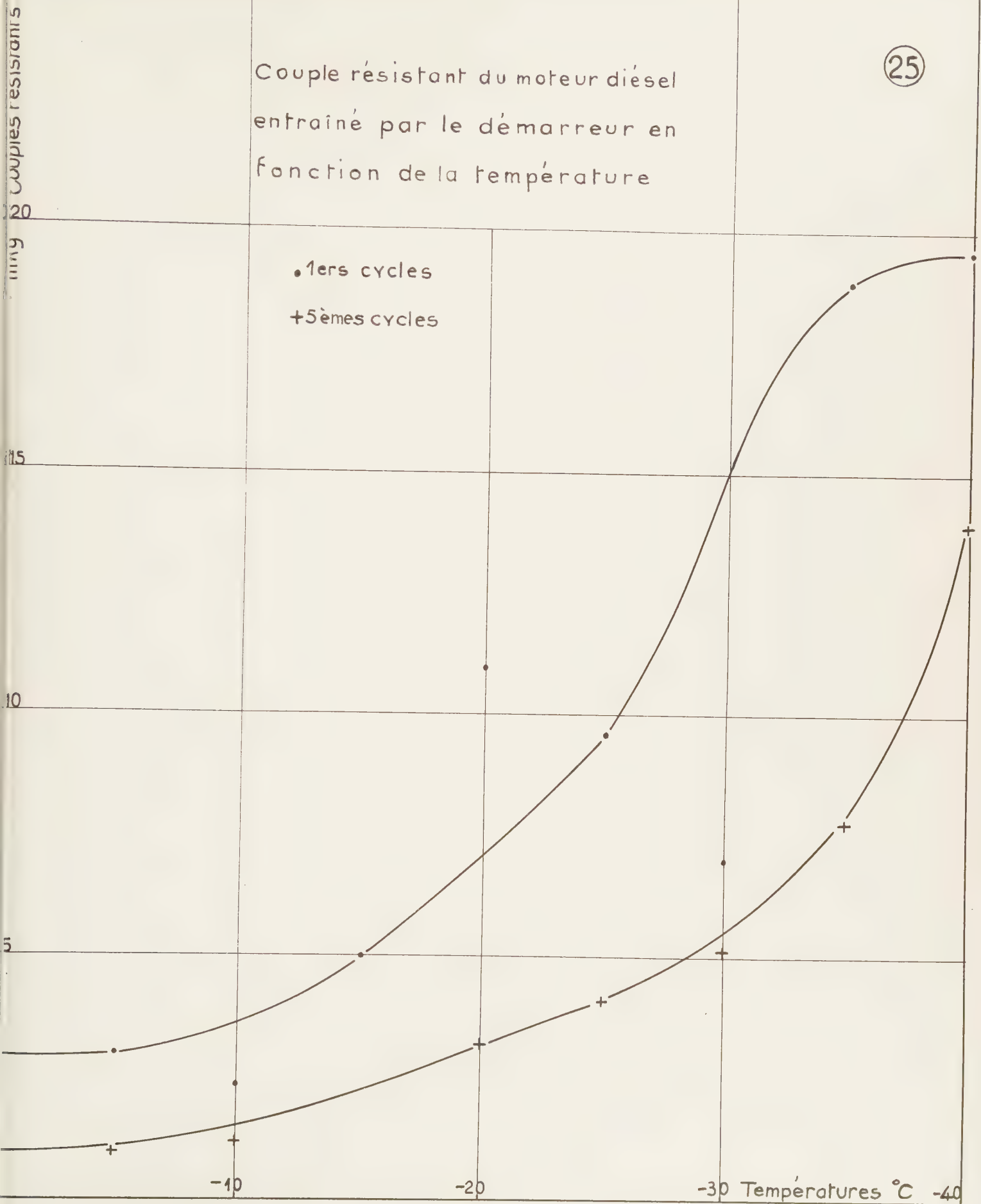
23 bis



Variation du couple résistant du moteur diesel en fonction du dégommage pour chaque température

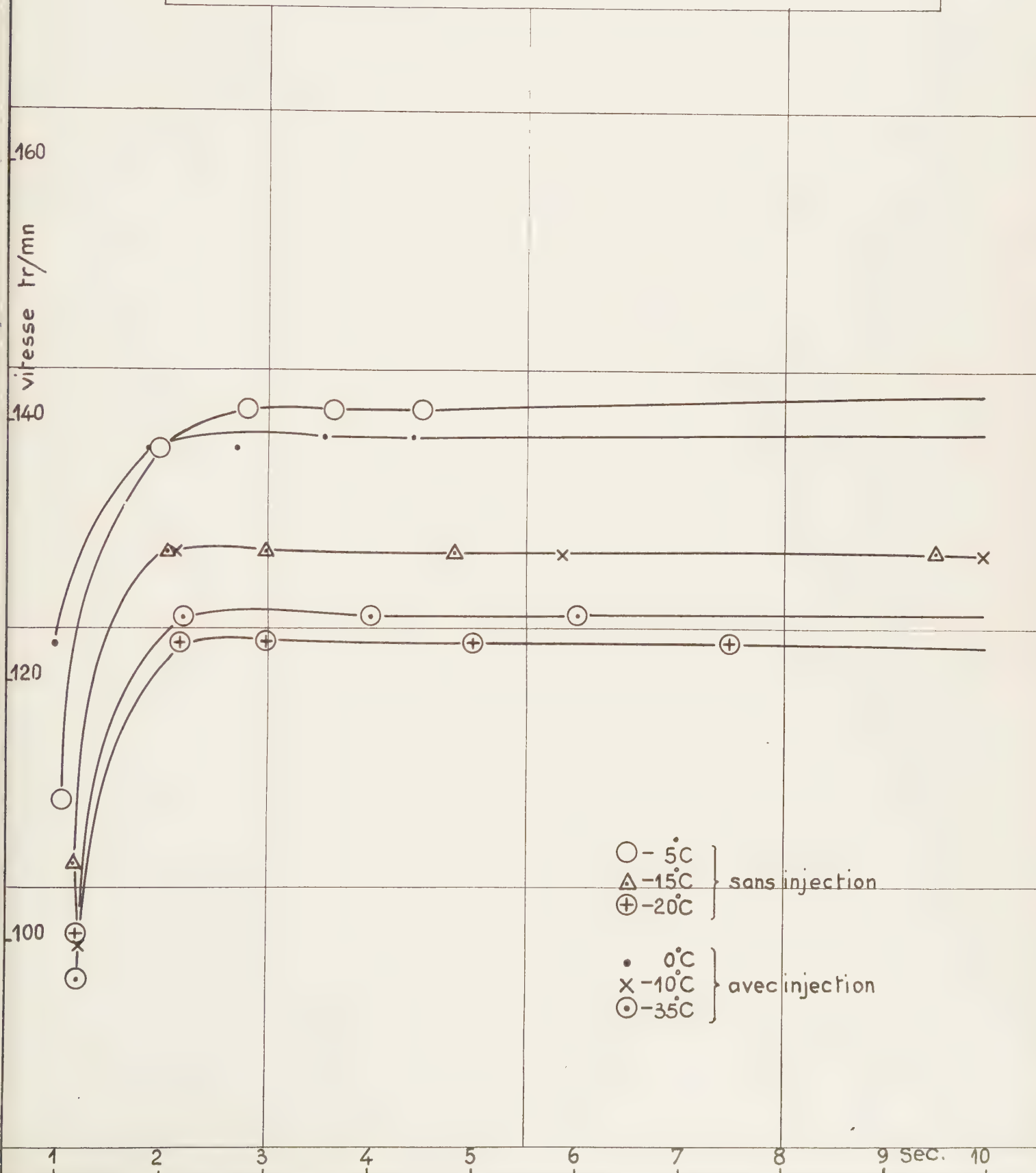


Couple résistant du moteur diésel
entraîné par le démarreur en
fonction de la température



Variation de la vitesse $V_1 \approx 150 \text{ tr/mn}$ en fonction du temps pour chaque température

(26)



Isothermes de la vitesse $V_2 \approx 500 \text{ tr/mn}$ en fonction
du temps d'entraînement par le moteur électrique

(27)

vitesse: tr/mn
rad/sec

550

500

450

400

350

300

250

200

150

100

0

5

10

15

20

seconds

● 0°C

○ -5°C

× -10°C

△ -15°C

○ -25°C

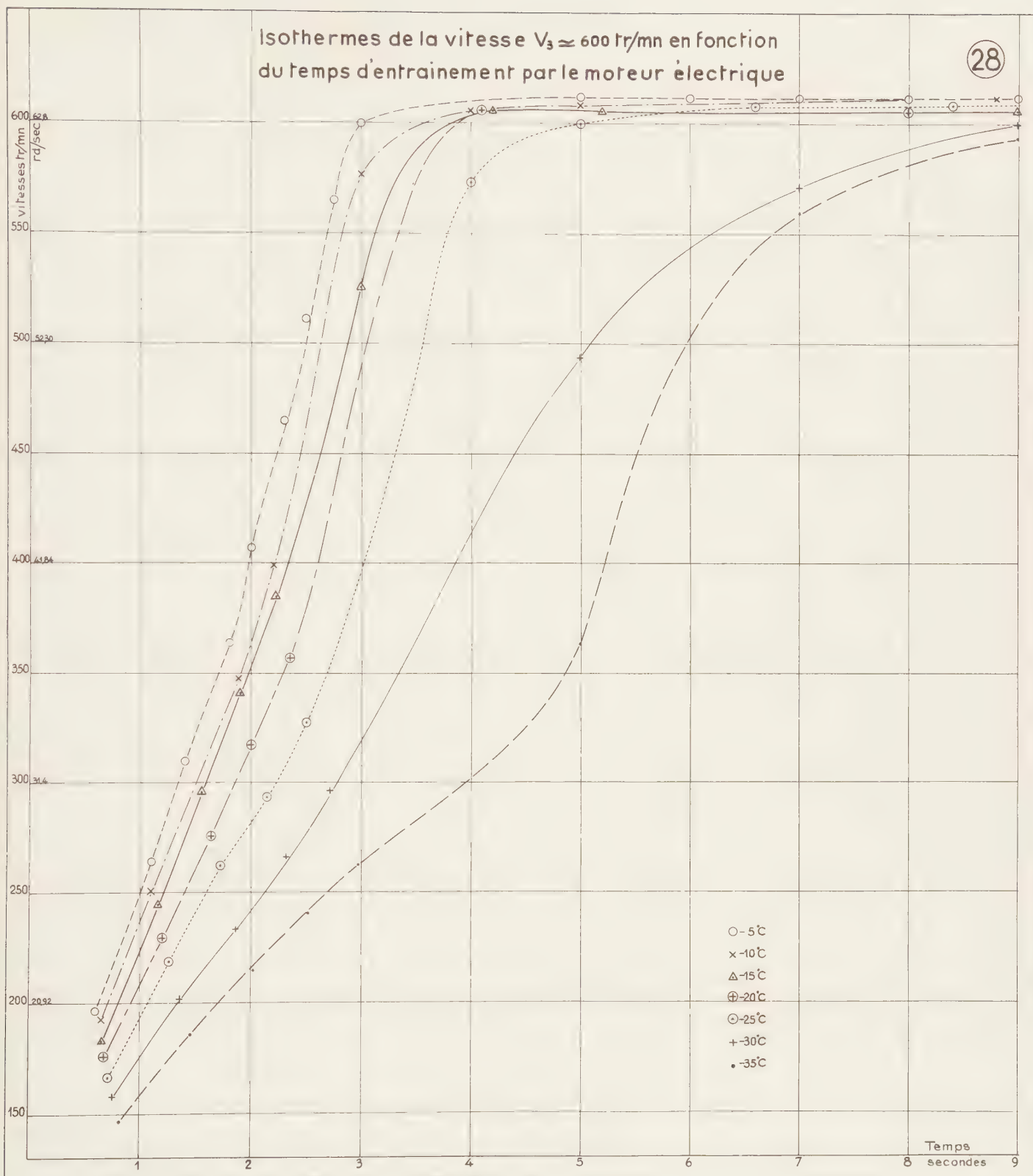
+ -30°C

+ -35°C

Temps

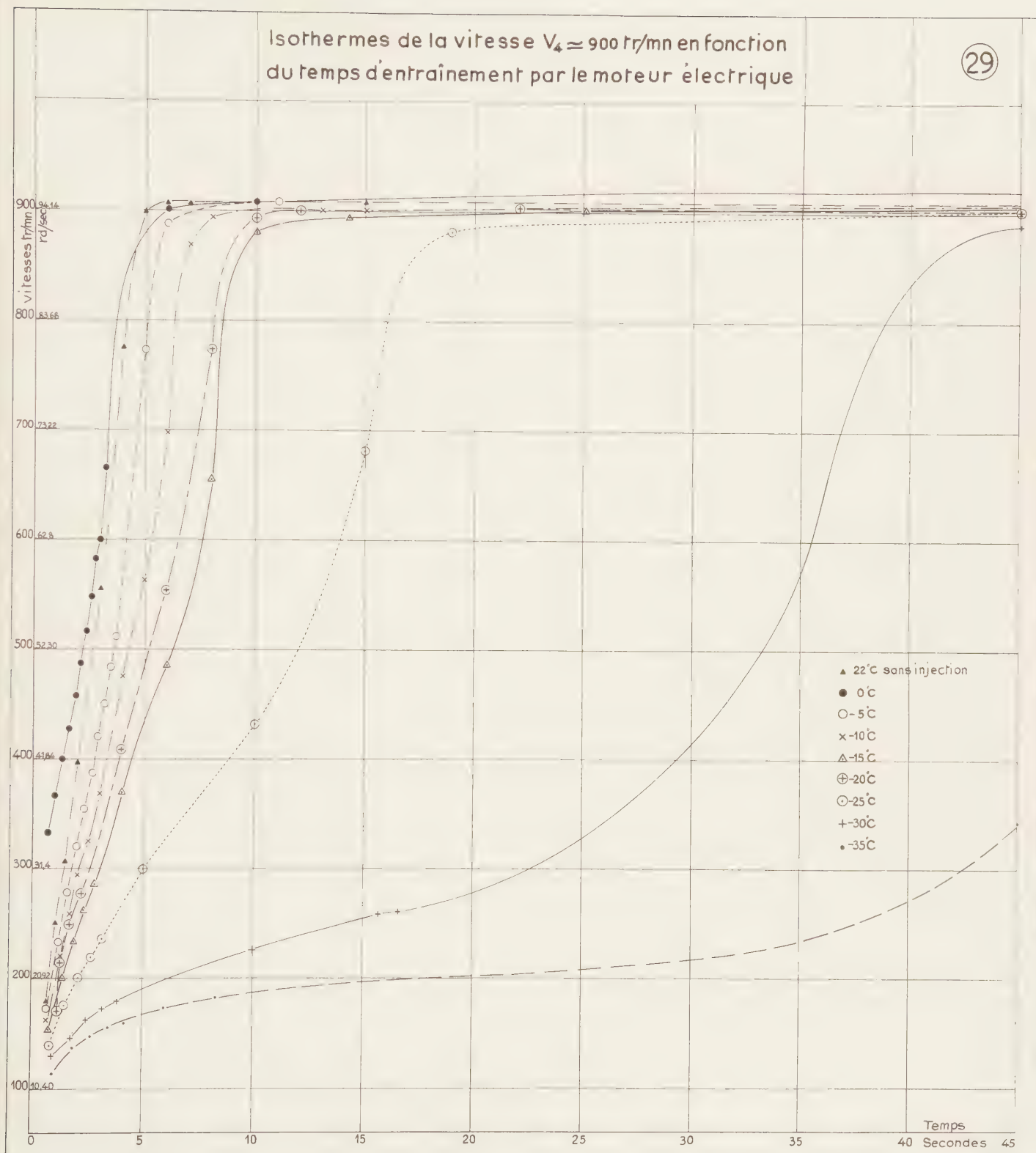
seconds

Isothermes de la vitesse $V_3 \approx 600$ tr/mn en fonction du temps d'entraînement par le moteur électrique

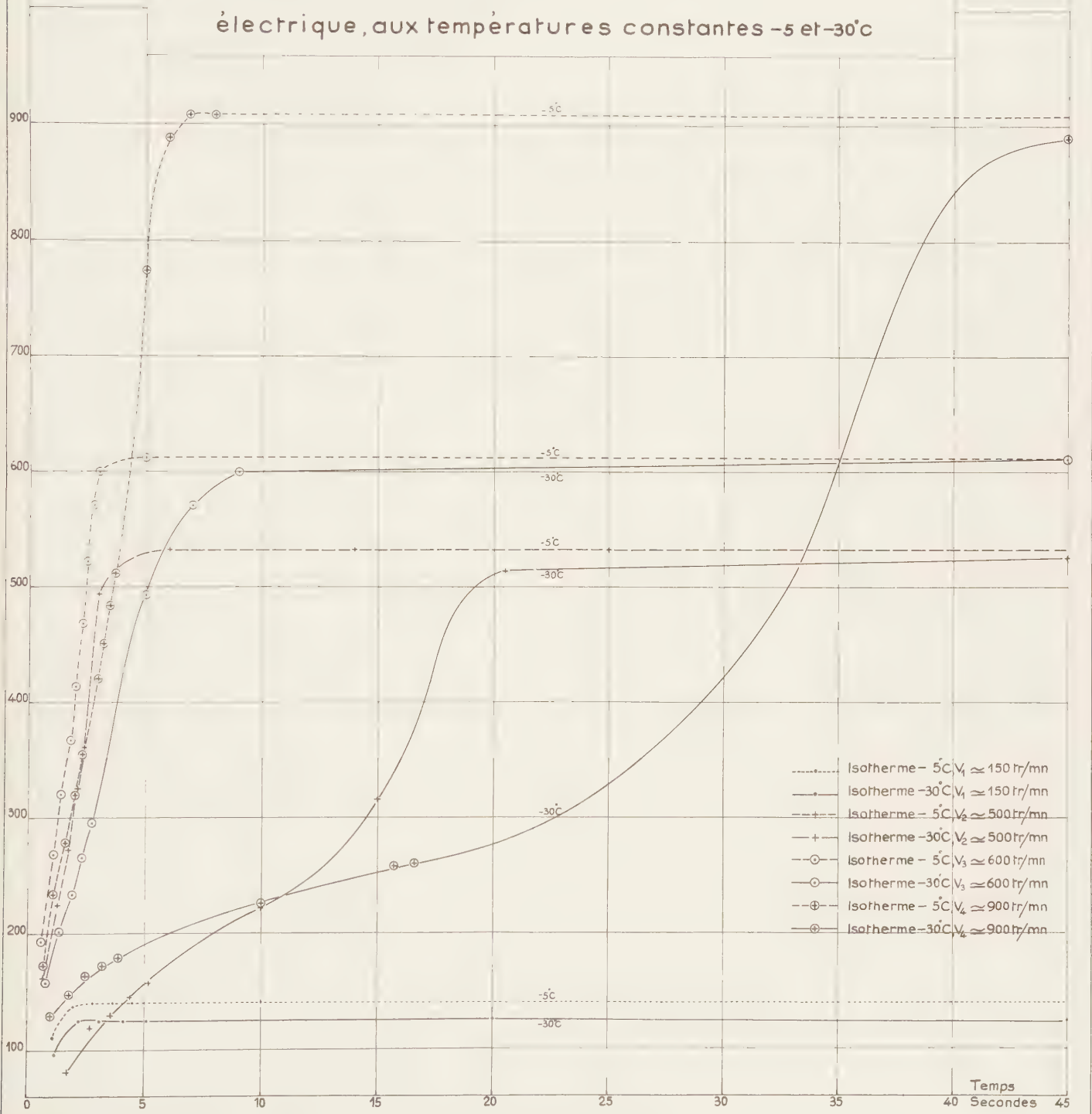


Isothermes de la vitesse $V_4 \approx 900 \text{ tr/mn}$ en fonction
du temps d'entraînement par le moteur électrique

(29)



Comparaison de la variation des différentes vitesses
en fonction du temps d'entraînement, par le moteur
électrique, aux températures constantes -5 et -30°C



III.- RESULTATS DES EXPERIENCES AVEC LE MOTEUR DIESEL ENTRAINE PAR LE MONTAGE ELECTRIQUE

3.1.- VARIATION DE LA VITESSE EN FONCTION DU TEMPS POUR CHAQUE TEMPERATURE

Les figures (26, 27, 28, 29) représentent la variation des différentes vitesses en fonction du temps dans les températures différentes. La diminution de la vitesse avec celle de la température dans toutes les figures est visible ; pour les vitesses élevées, dont les couples sont réduits on observe une longue durée d'accélération avec un point d'inflexion.

La figure (30) représente la comparaison des vitesses pour les températures, - 5 et - 30°C. On en conclut que :

- la durée d'accélération diminue avec l'augmentation du couple ;
- la diminution de la vitesse est plus grande pour les vitesses élevées du fait de leur faible couple ;
- le pourcentage de la diminution de vitesse est le plus faible pour la vitesse moyenne ;
- la durée du dégommage diminue avec le couple.

Donc il en résulte que :

- le gommage du moteur à froid augmente considérablement le couple résistant ; il est donc utile d'entraîner le moteur décompressé pendant un temps déterminé ;
- le couple résistant croît avec l'abaissement de température et la vitesse d'entraînement diminue, donc il faut augmenter la puissance des démarreurs.

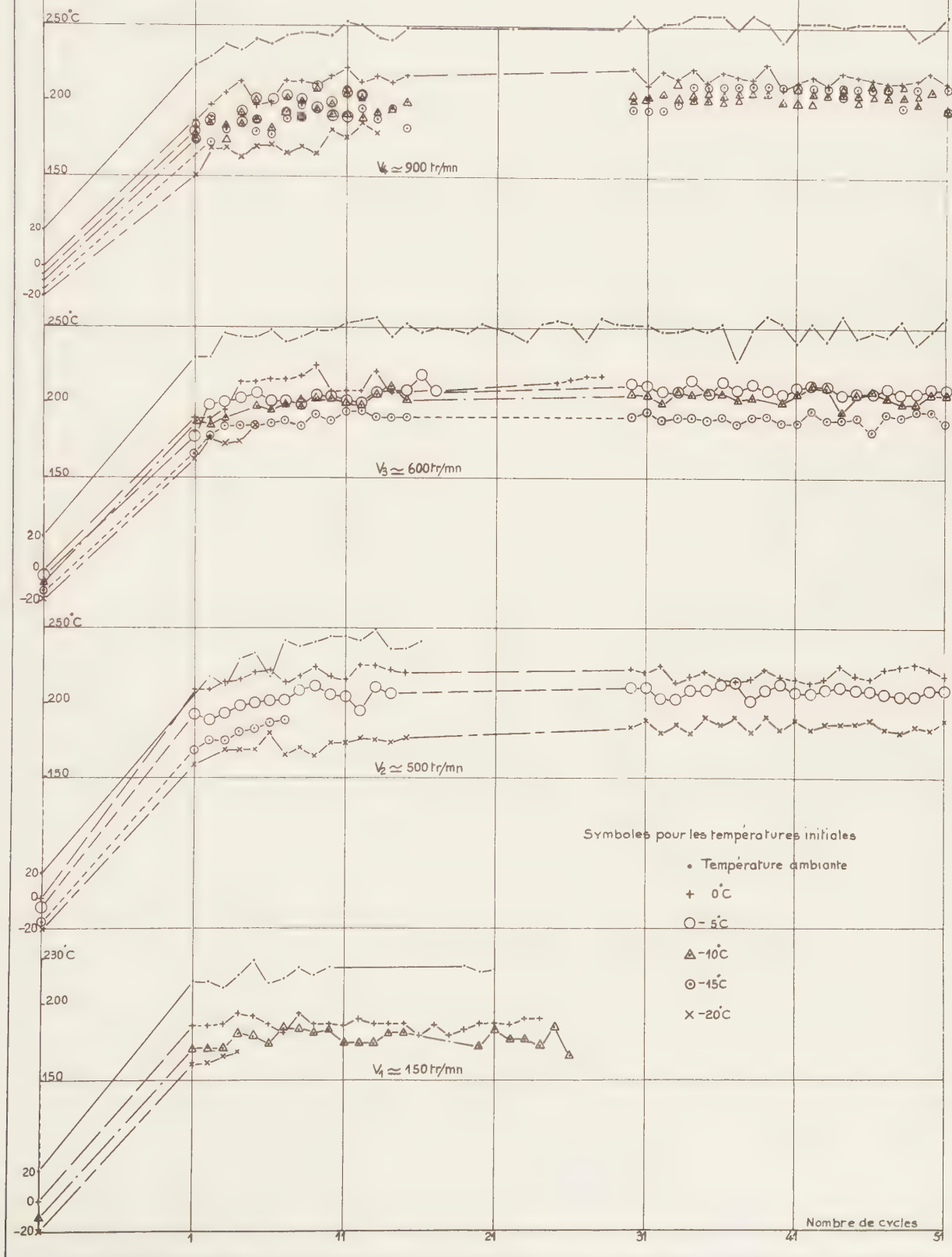
La figure (25) représente la variation du couple résistant du moteur entraîné par le démarreur et la figure (23 bis) la variation de la vitesse d'entraînement en fonction de la température. On remarque que de 0 à - 40°C le couple résistant est multiplié par 6,5, tandis que la valeur de vitesses est divisée par deux, donc la puissance mécanique produite par le démarreur dans cet intervalle de température est multiplié par 3,25, or en augmentant le couple d'entraînement on fait diminuer la baisse de la vitesse qui est nuisible pour le démarrage du moteur.

3.2.- VARIATION DE LA TEMPERATURE EN FONCTION DU TEMPS D'ENTRAINEMENT

La figure (31) montre la variation cyclique de température. Il est évident que le démarrage interviendra dans le cycle quand la

Variation des maxima des températures des cycles pour chaque vitesse en fonction de la température initiale et des cycles

(31)





Variation du temps de démarrage de chaque vitesse en fonction de la température (courbes pointillées)

Temps de démarrage de chaque vitesse dans une température constante (lignes horizontales)

↓ indique le démarrage pour chaque vitesse du moteur électrique

↑ indique le démarrage par le démarreur

Remarques :

1. Les vitesses indiquées correspondent à la température ambiante

2. Le moteur entraîné par le démarreur est alimenté par fuel

Le moteur entraîné par le moteur électrique est alimenté par gasoil

Temps 40 secondes

valeur maximale de température sera la plus élevée et les conditions d'inflammation réunies ; c'est pour cela que nous avons reporté sur la figure (31) les maximum de température des cycles. On en conclut que la température maximum augmente avec :

- l'augmentation de la température initiale ;
- l'augmentation de la durée d'entraînement ;
- l'augmentation de la vitesse d'entraînement.

La vitesse d'entraînement élevée provoque une compression rapide évitant la perte de pression et de chaleur.

3.3.- VARIATION DE LA PRESSION MAXIMALE AVEC LA VITESSE D'ENTRAÎNEMENT

La vitesse élevée de rotation provoque une compression rapide, diminue la perte de charge et de chaleur et par là augmente la pression maximale. Pour les basses vitesses d'entraînement la baisse de pression est importante ; mais tant que la température baisse, l'étanchéité du cylindre augmente, du fait de l'augmentation de la viscosité de l'huile de graissage, ainsi que de l'accumulation du combustible injecté fait croître le taux de compression donc la pression maximale augmente. Bien que l'accroissement de la vitesse augmente la pression lorsqu'il est très important il peut réduire l'admission, ce qui fait baisser la pression. Dans le cas de notre étude, où la vitesse est inférieure à 1000 tr/mn, nous n'avons pas remarqué ce phénomène (Tab. 1 à 6).

3.4.- VARIATION DU TEMPS D'ENTRAÎNEMENT NECESSAIRE POUR L'APPARITION DE LA FLAMME EN FONCTION DE L'ABAISSEMENT DE TEMPERATURE POUR CHAQUE VITESSE

Lorsqu'on a été amené à déplacer la roue libre, le moteur diesel s'est trouvé accouplé avec une boîte de vitesse ; dans ce cas là, au premier coup de démarrage, le moteur est freiné et tout de suite éteint ; donc il n'est pas possible de distinguer le démarrage effectif, de l'apparition de la flamme ; comme notre but n'est pas de déterminer les caractéristiques du démarrage d'un moteur, mais au contraire la comparaison de son comportement vis à vis de la variation des conditions atmosphériques et de vitesses ; nous nous sommes fixés à retenir pour l'étude la première apparition de flamme.

La figure (32) démontre la durée d'entraînement pour chaque vitesse en vue d'apparition de la flamme dans les différentes températures. Dans la phase d'entraînement avec le démarreur, le combustible utilisé est le fuel oil domestique et pendant l'entraînement avec le moteur électrique, le combustible utilisé est un gas oil arctique ; avec le premier la flamme cesse d'apparaître aux alentours de -15°C et avec le deuxième aux alentours de -10°C .

De la figure (32) on peut déduire qu'à la vitesse moyenne $V_3 \approx 600$ tr/mn que la chute de vitesse en fonction de la température n'est pas trop élevée. Le comportement est meilleur que dans les basses ou les hautes vitesses.

3.5.- L'EVOLUTION DE LA TEMPERATURE DE L'HUILE ET DE LA PAROI

Etant donné la faible durée d'entraînement et le volume de l'huile du carter du moteur, l'augmentation de la température de l'huile sous l'effet des frottements ne dépasse pas un ou deux degrés.

La température de la paroi mesurée à l'endroit de deux millimètres de la face intérieure de la paroi, présente une augmentation de la température moyenne enregistrée ; la valeur de cette augmentation est de l'ordre de 1 à 2°C pour une durée maximum d'entraînement d'une minute.

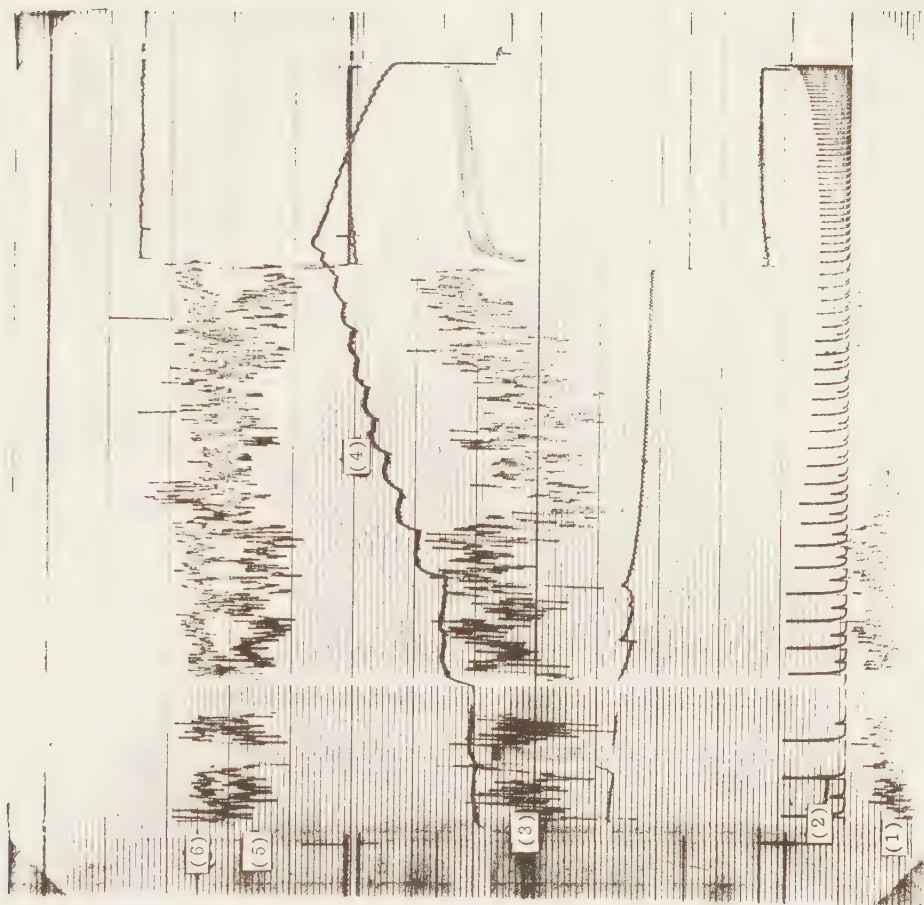
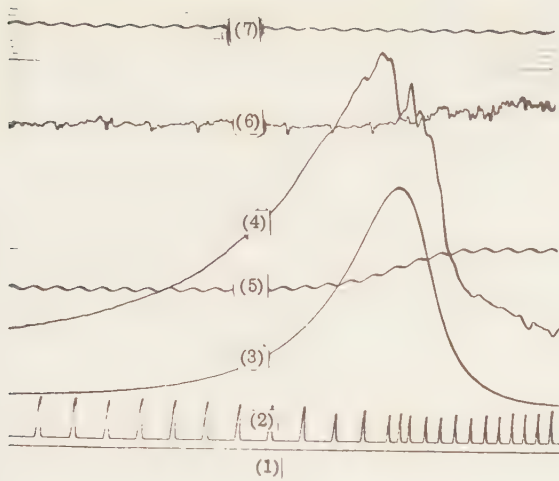
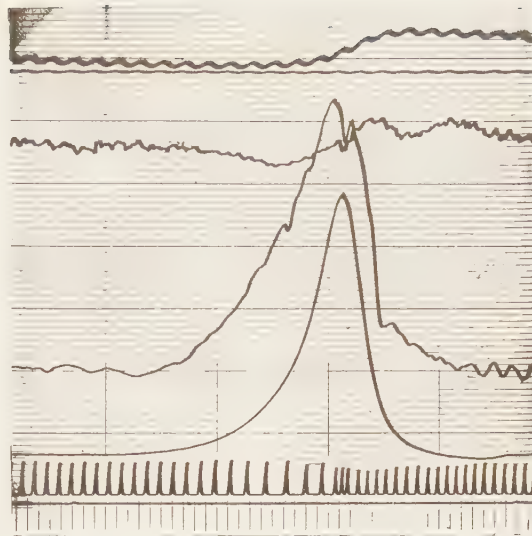


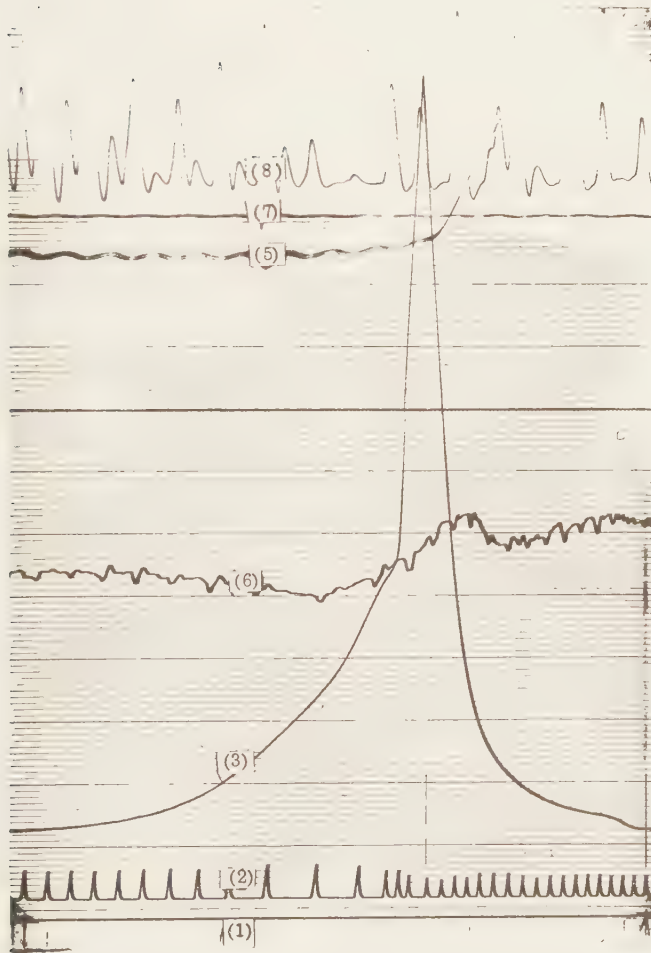
Fig. 33. Les enregistrements perturbés par les parasites; le moteur entraîné par le démarreur
 (1). Température de l'air (2). Marquage des angles de rotation (3). Température de l'échappement (4). Température dans la chambre de combustion par un thermocouple blindé (5). Température de la paroi (6). Température de l'huile.



a. Le 1er cycle



b. le 20ème cycle



c. Le 21ème cycle; début du démarrage

Fig. 34. Enregistrements à la température ambiante; le moteur entraîné avec la vitesse $v_1 \approx 150$ tr/mn.

Légendes valables pour tous les enregistrements du moteur entraîné par le montage électrique.

1. La base de temps; intervalles des traits verticaux $\frac{1}{100}$ et $\frac{1}{10}$ de seconde.

2. Marquage des angles de rotation, chaque intervalle 10° , seulement deux intervalles avant et après le P.M.H. 5° .

3. Pression dans la chambre de combustion

4. Température dans la chambre de combustion, indiquée par le thermomètre à résistance.

5. La température de la chambre de combustion indiquée par le thermocouple.

6. Vitesse instantanée.

7. Température de la paroi

8. Température de l'huile

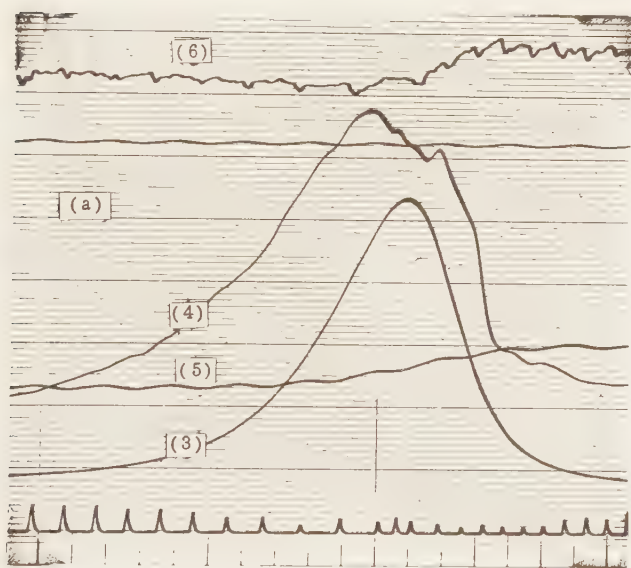
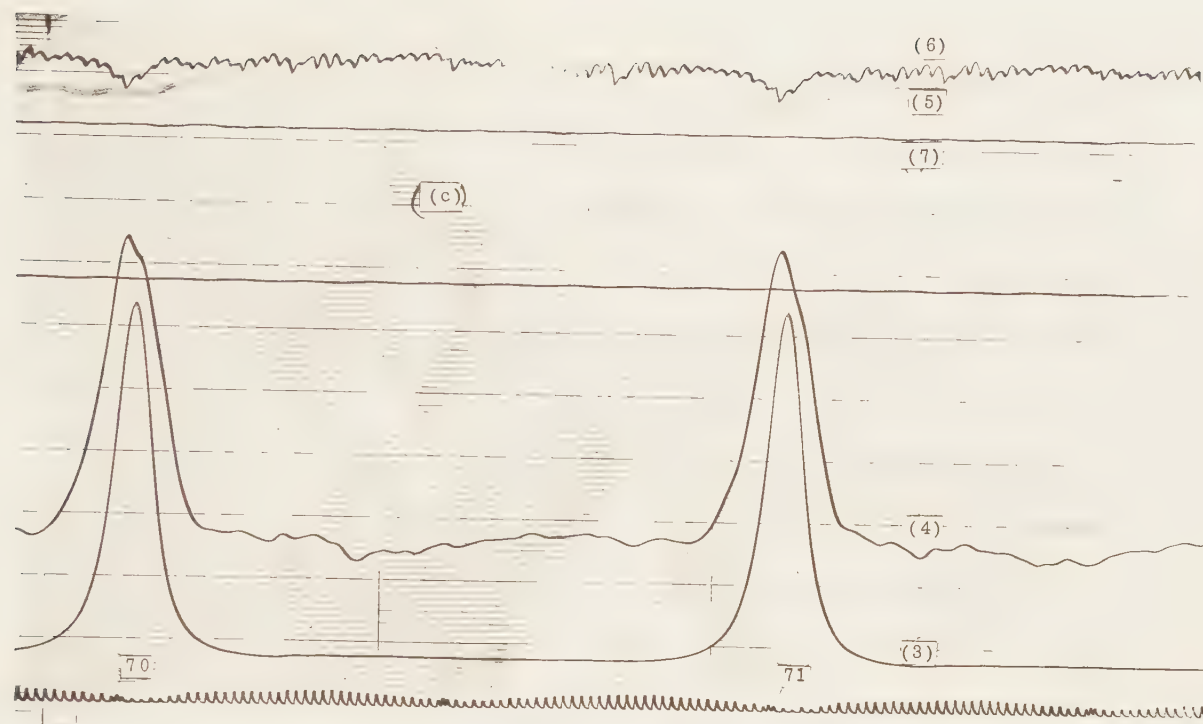
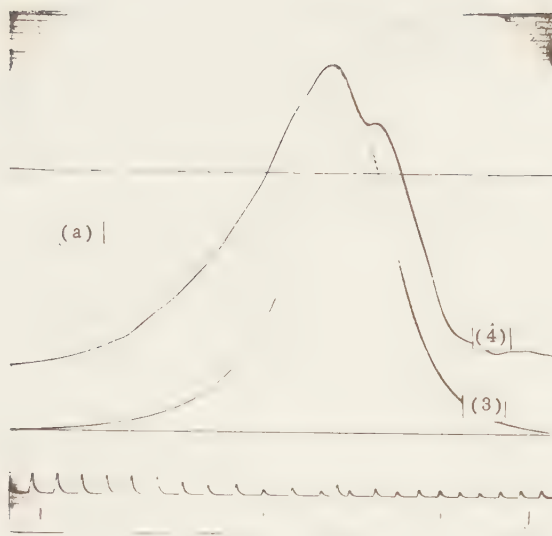
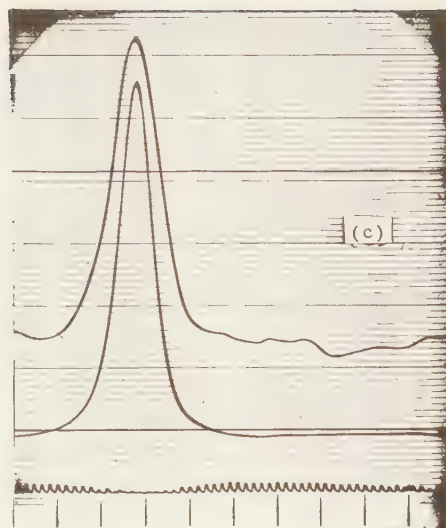


Fig. 35. Enregistrements à la température ambiante; le moteur entraîné avec la vitesse $v_3 \approx 600$ tr/mn
 a. Le 1er cycle
 b. Le 2ème cycle et le début du démarrage
 c. Les 70ème et 71ème cycles.



a. Le 3ème cycle



c. Le 66ème cycle

b. Le 2ème cycle et le début du démarrage

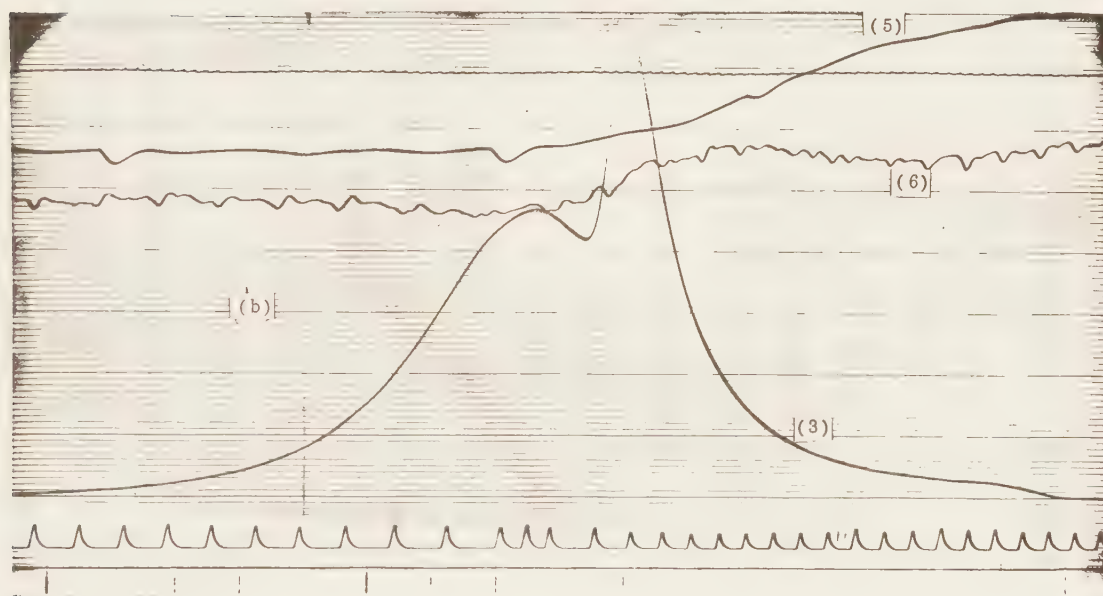


Fig. 36. Enregistrements à la température ambiante; le moteur entraîné avec la vitesse $v_4 \approx 900$ tr/mn

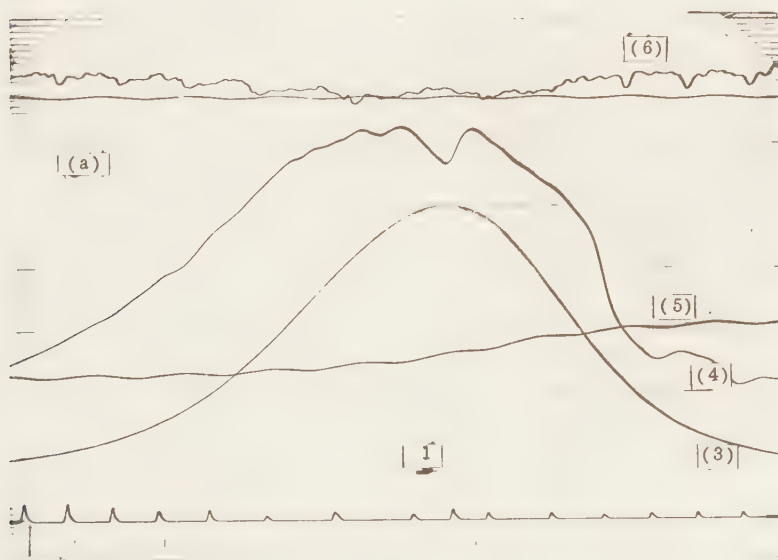
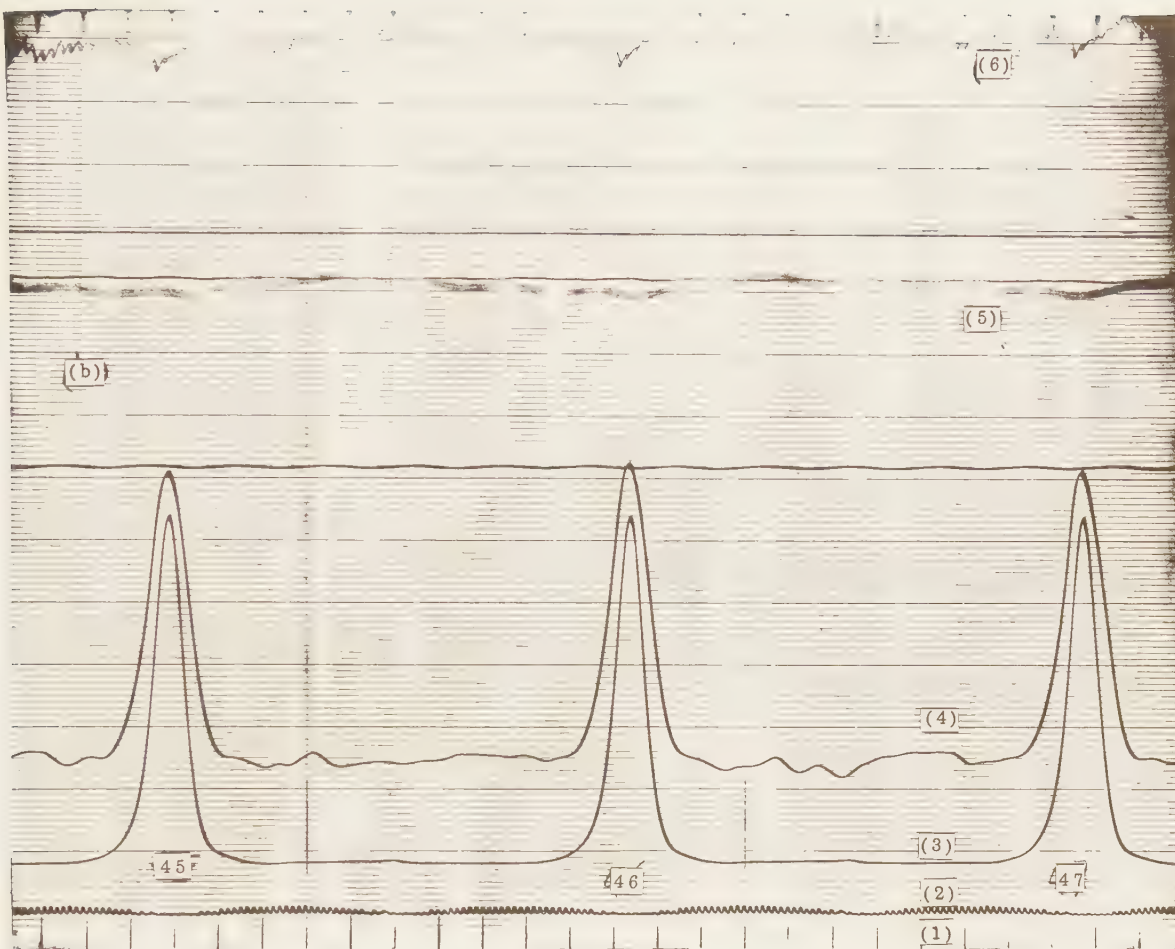


Fig. 37. Enregistrements à la température ambiante; le moteur entraîné à la vitesse de $v_5 \approx 1200$ tr/mn

- a. Le 1^{er} cycle
- b. Les 45, 46 et 47^{ème} cycles.

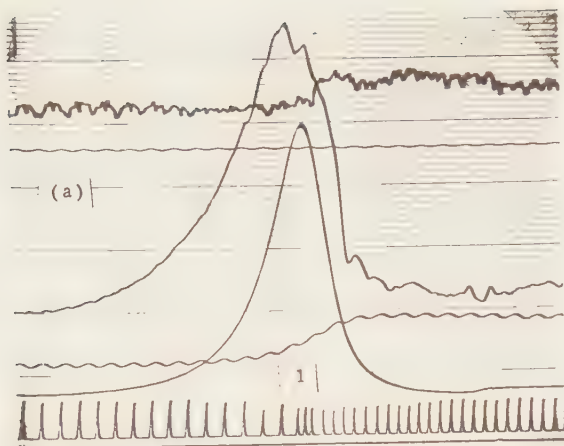
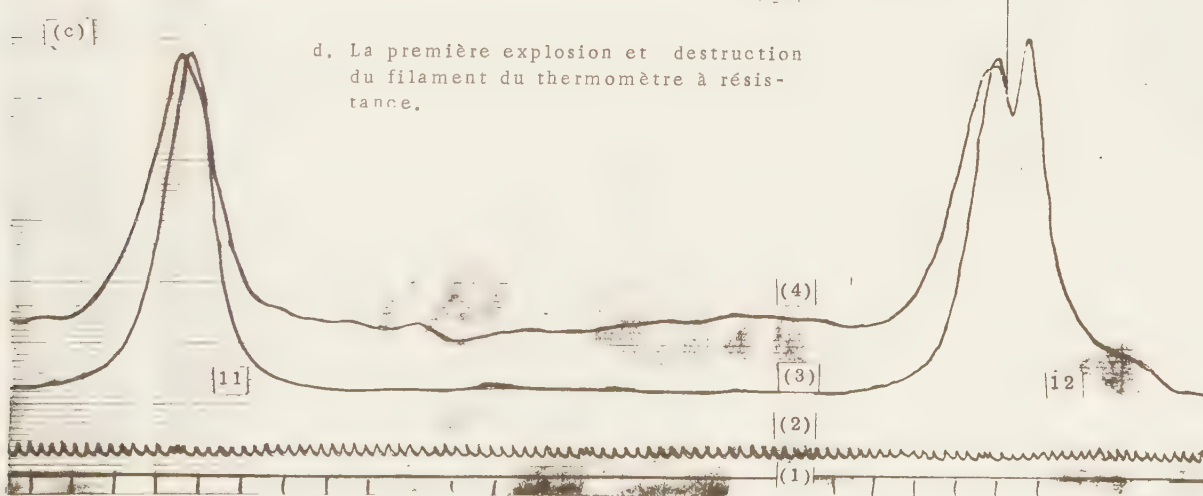
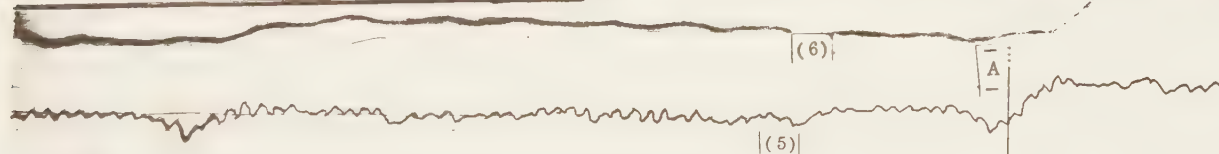
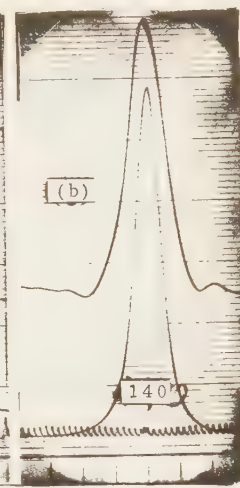
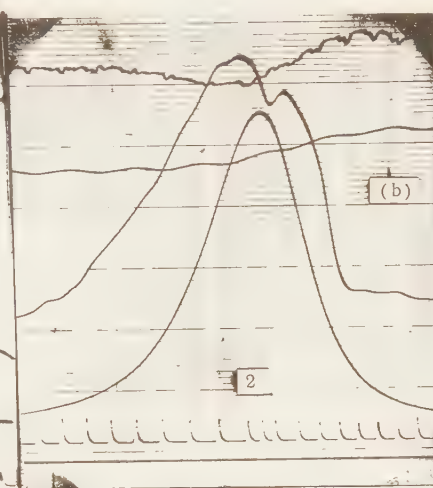
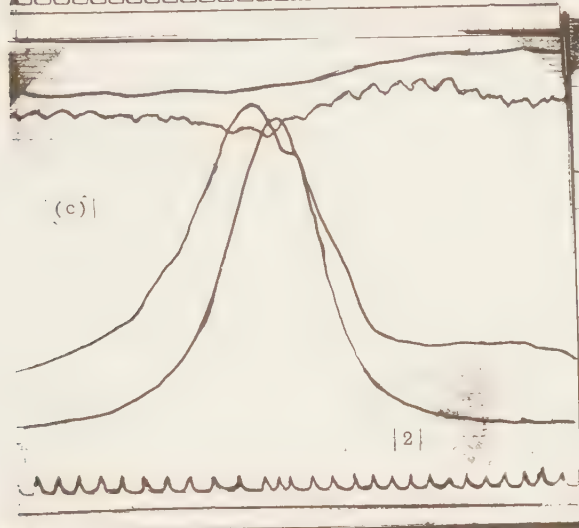
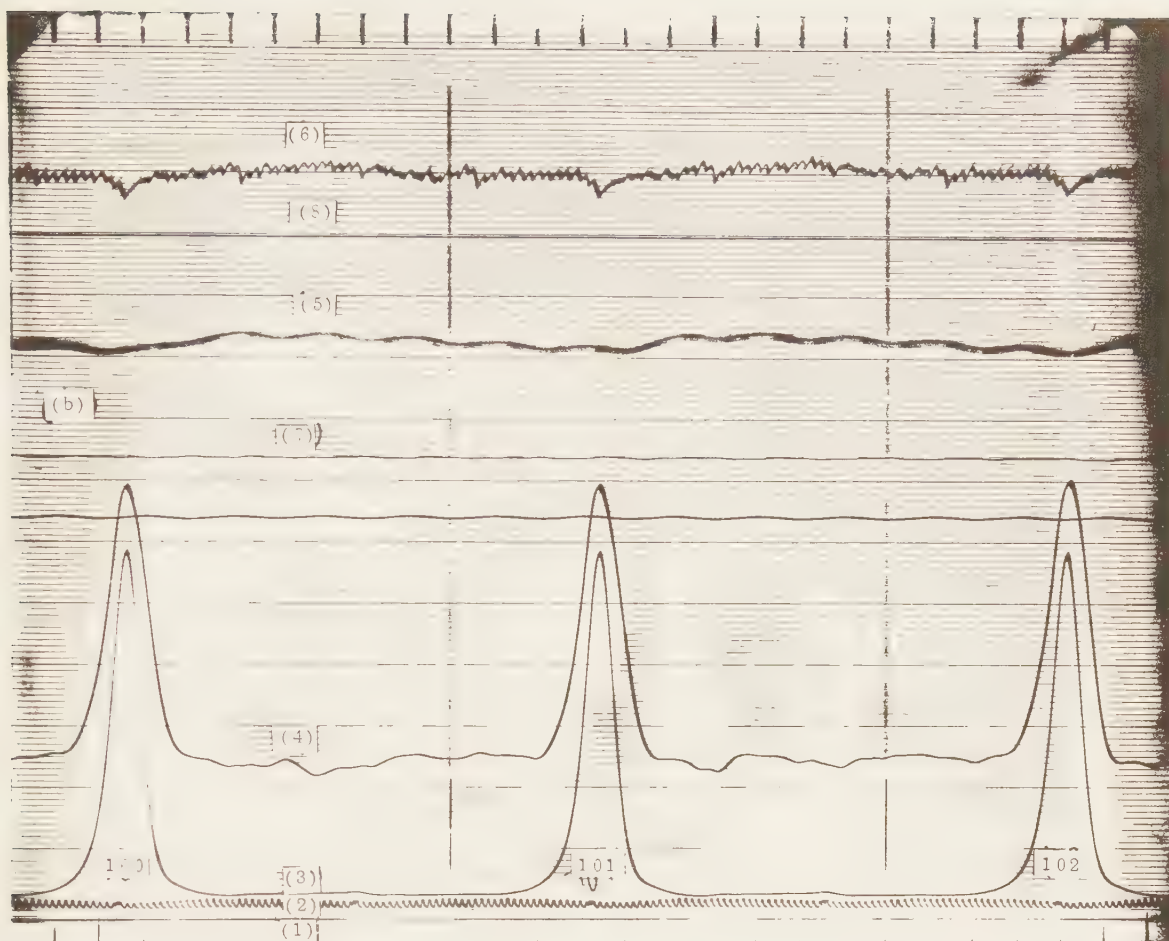


Fig. 38. Enregistrements à la température de 0°C.

- a. Le 1er cycle à la vitesse de $v_1 \approx 150$ tr/mn
- b. Les 2 et 140ème cycles à la vitesse de $v_4 \approx 900$ tr/mn
- c. Les 2, 11 et 12ème cycles avec les début du démarrage au 12ème cycle.



d. La première explosion et destruction du filament du thermomètre à résistance.



b. les 100, 101 et 102ème cycles

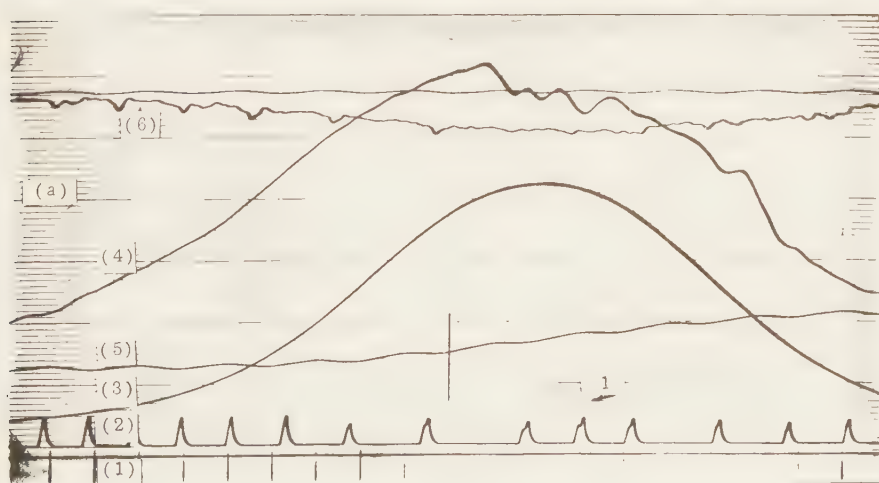
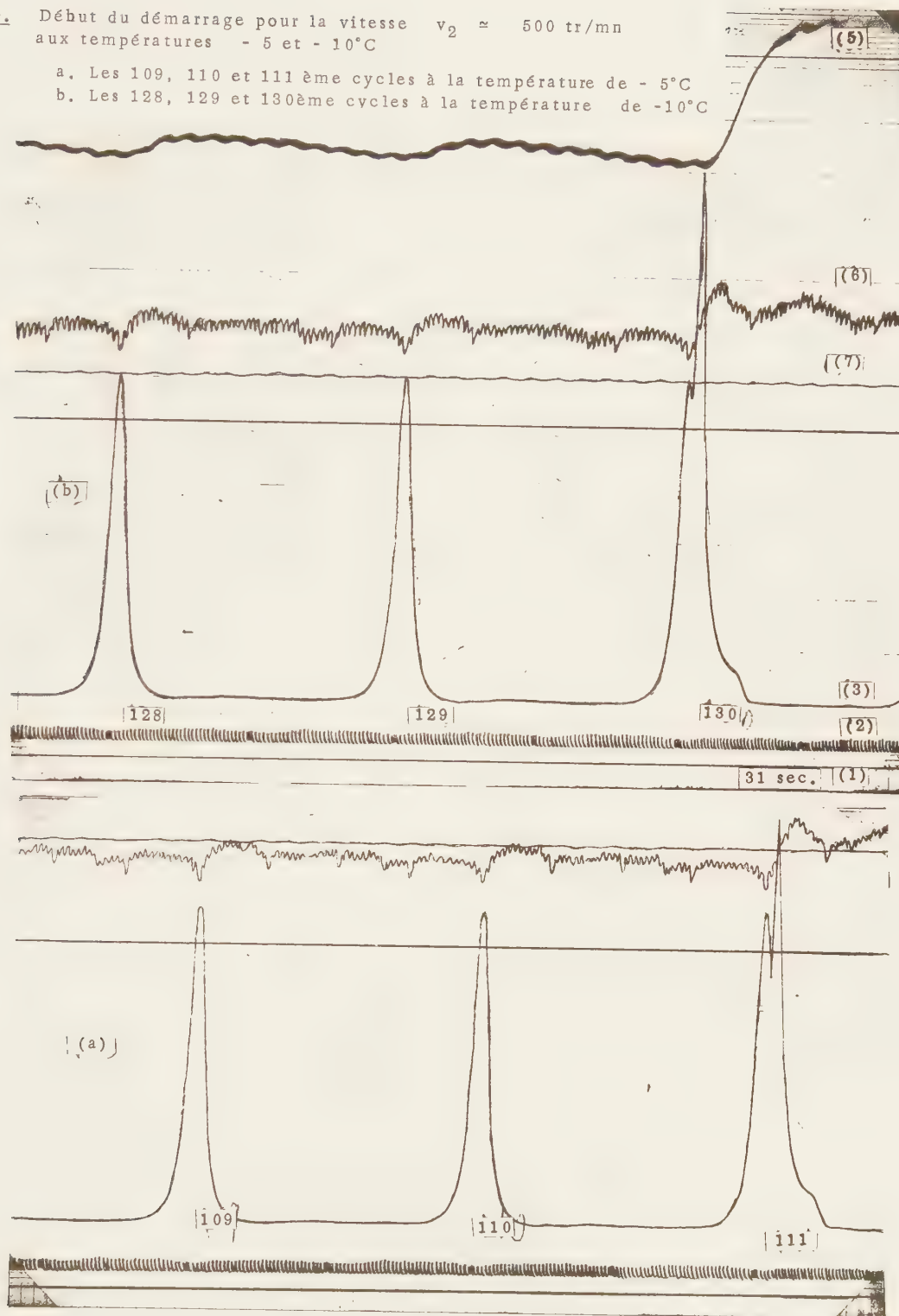


Fig. 39 Enregistrements à la température de 0°C.

a. Le 1er cycle à la vitesse $v_{\kappa} \approx 1200$ tr/mn.

Fig. 40. Début du démarrage pour la vitesse $v_2 \approx 500$ tr/mn
aux températures - 5 et - 10°C

- a. Les 109, 110 et 111 ème cycles à la température de - 5°C
b. Les 128, 129 et 130ème cycles à la température de -10°C



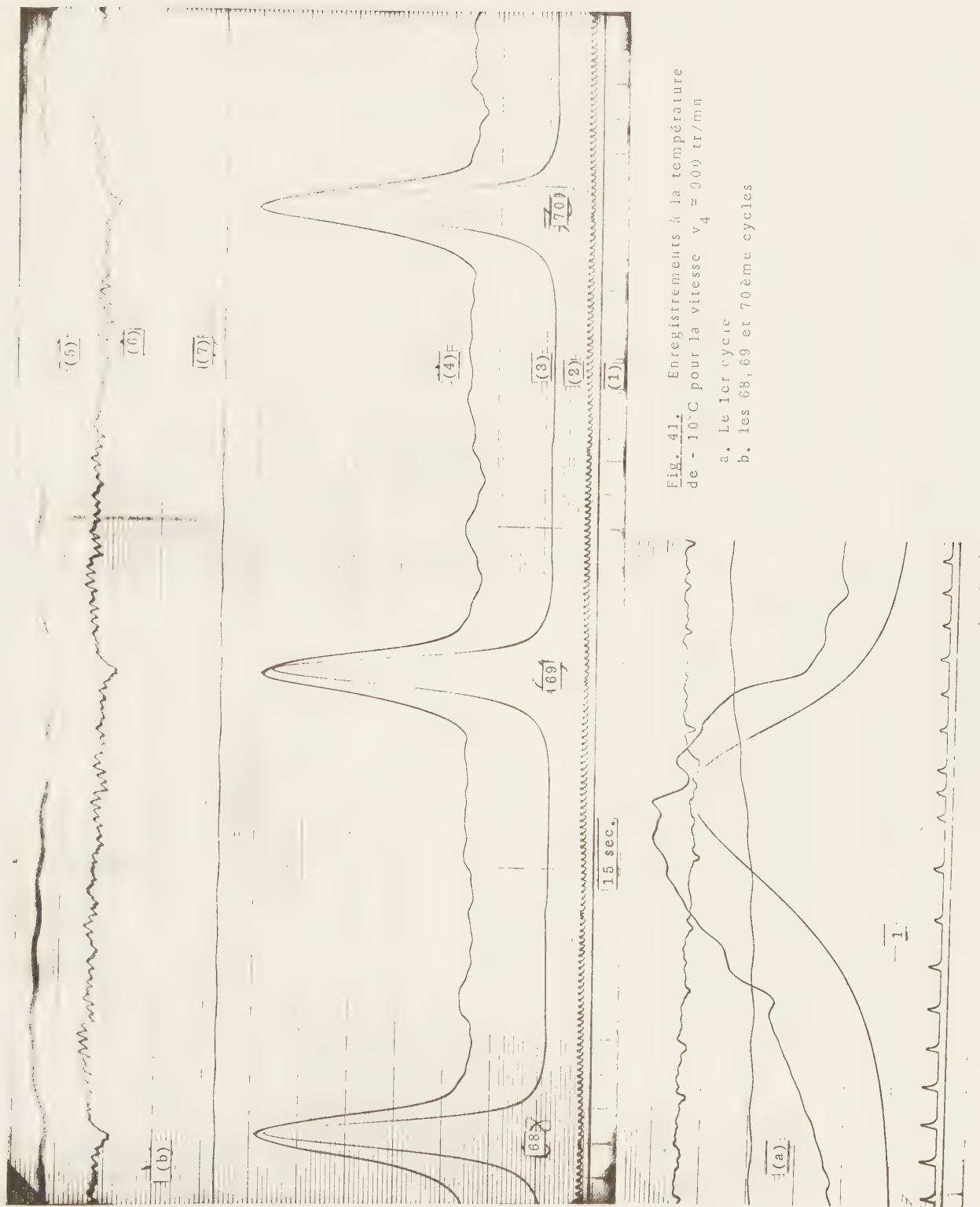


Fig. 41. Enregistrements à la température de -10°C pour la vitesse $v_4 \approx 900 \text{ tr/mn}$

- a. Le 1er cycle
- b. les 68, 69 et 70ème cycles

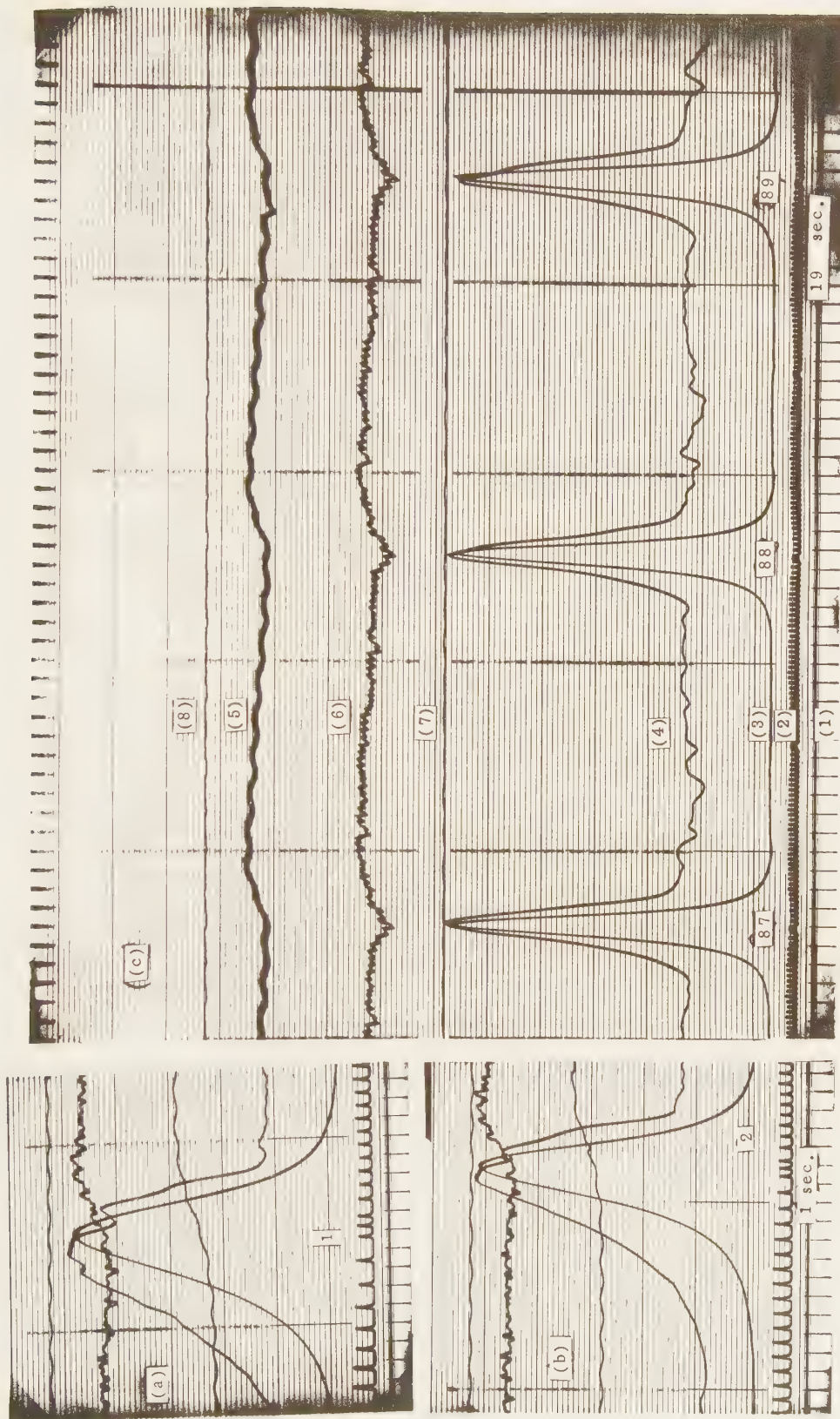


Fig. 42. Enregistrement à la température de -15°C , pour la vitesse $v_3 \approx 600 \text{ tr/mn}$
 a. Le 1er cycle
 b. Le 2ème cycle
 c. Les 87, 88 et 89ème cycles

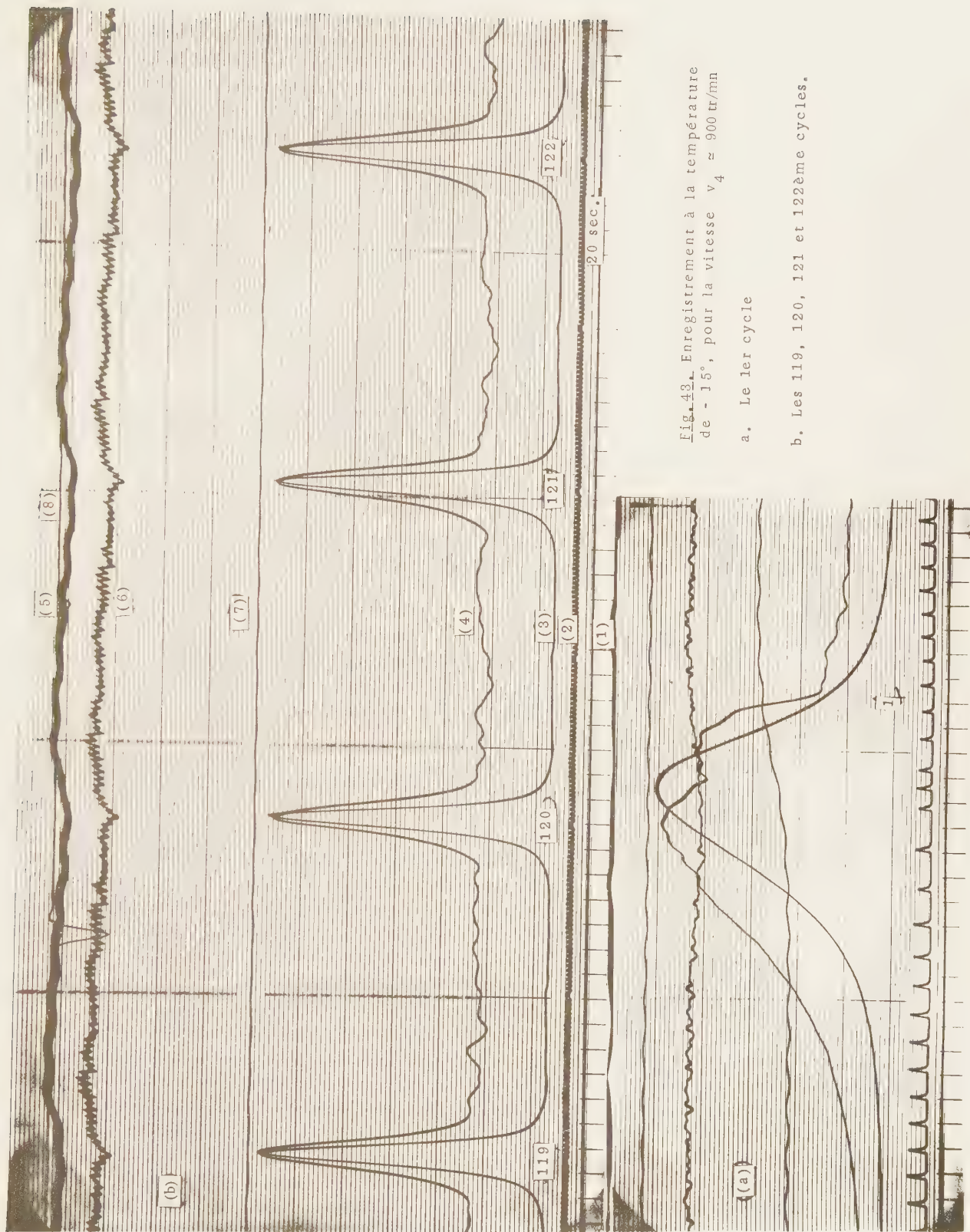


Fig. 43. Enregistrement à la température de -15° , pour la vitesse $v_4 \approx 900$ tr/mn

a. Le 1er cycle

b. Les 119, 120, 121 et 122ème cycles.

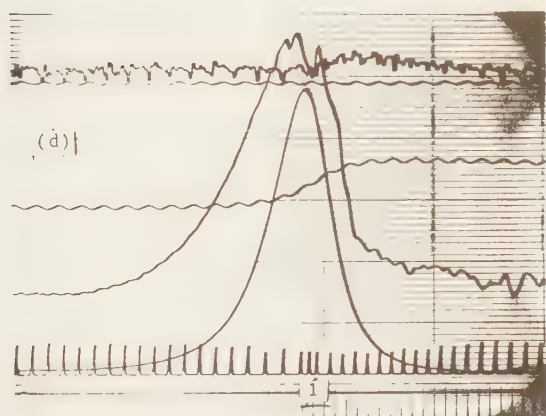
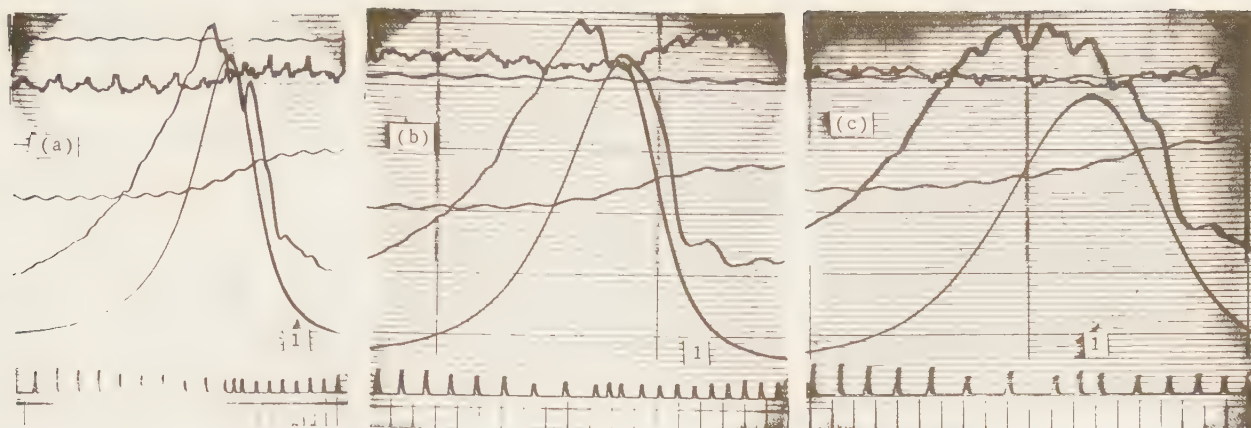


Fig. 44. Enregistrements à la température de -20°C .

- a. Le 1er cycle pour la vitesse $v_1 \approx 150$ tr/mn
- b. Le 1er cycle pour la vitesse $v_3 \approx 600$ tr/mn
- c. Le 1er cycle pour la vitesse $v_4 \approx 900$ tr/mn
- d. Le 1er cycle pour la vitesse $v_2 \approx 500$ tr/mn
- e. Les 81, 82, 83, 84 et 85 ème cycles pour la vitesse $v_2 \approx 500$ tr/mn

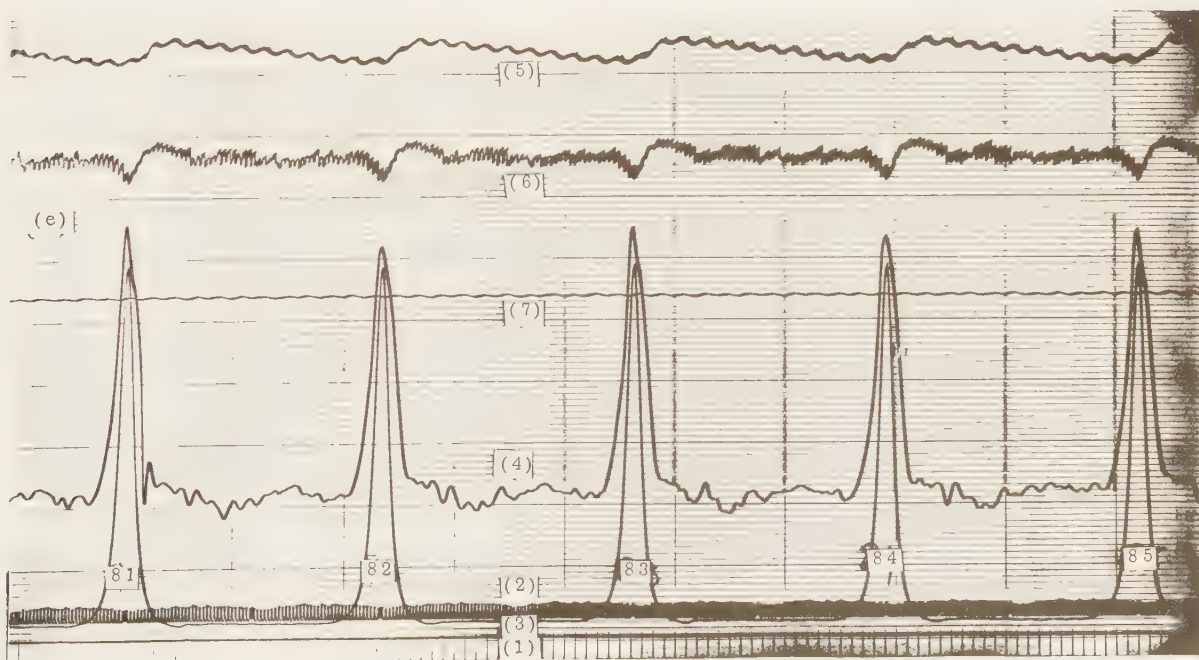
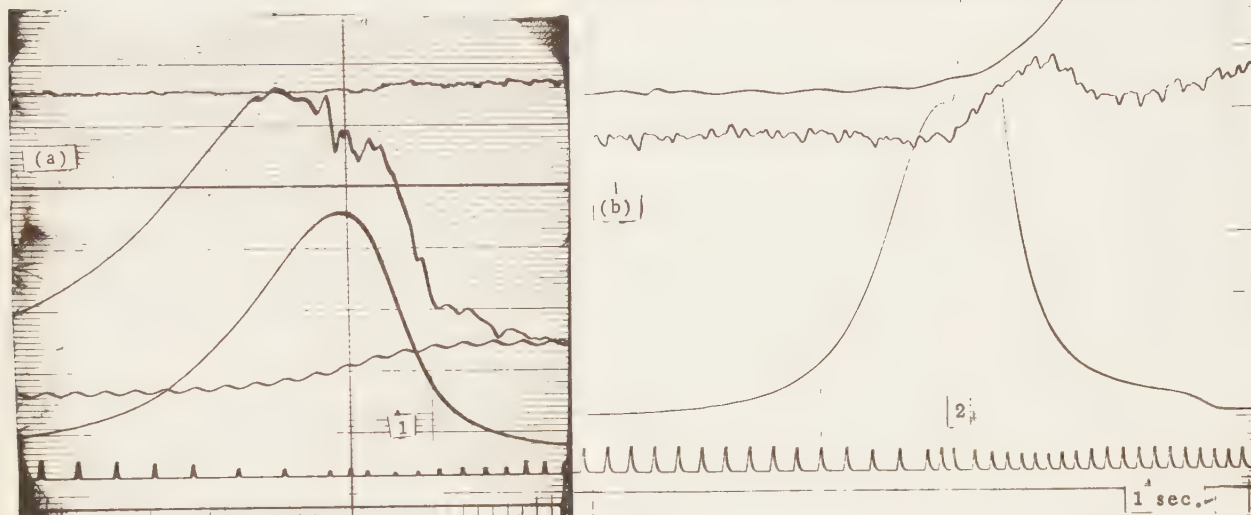
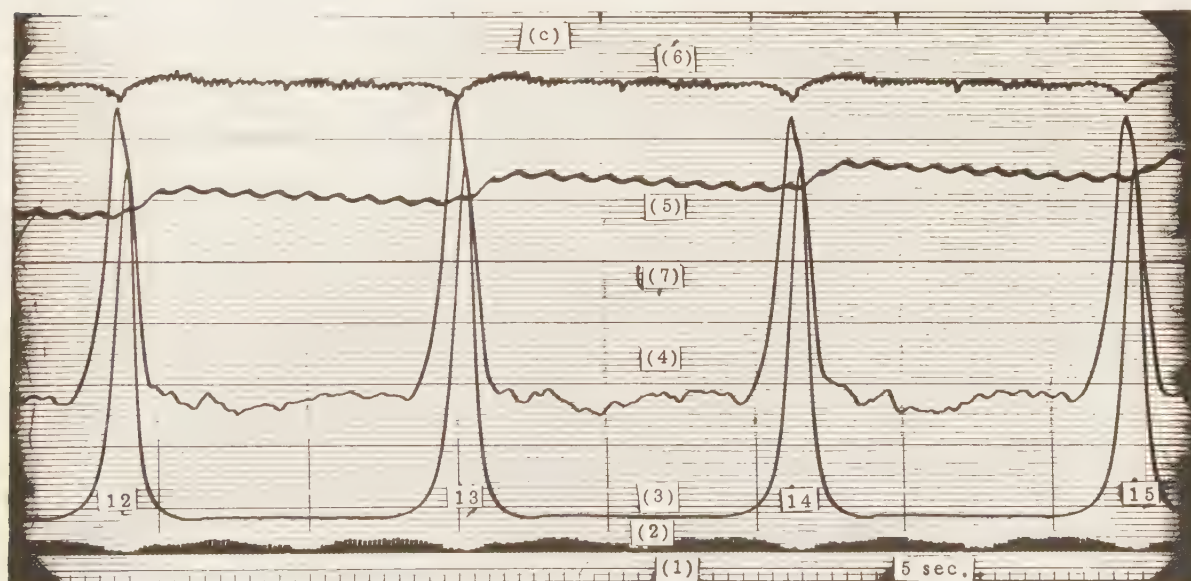


Fig. 45. Enregistrement à la température ambiante pour la vitesse $v_2 \approx 500$ tr./mn



a. Le 1er cycle sans injection du combustible
b. Le 2ème cycle, et le début du démarrage



c. Les 12, 13, 14 et 15ème cycles.

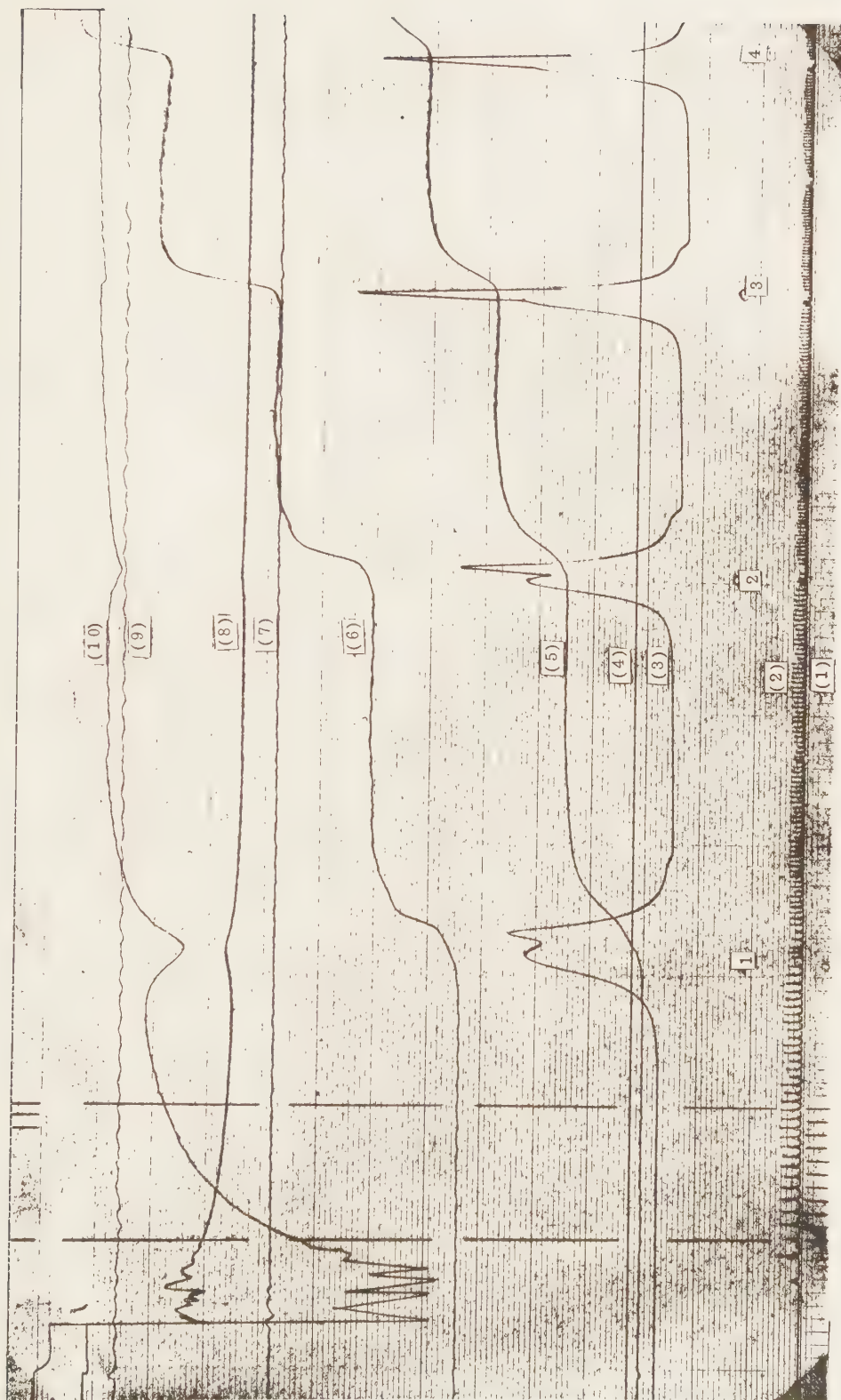


Fig. 46. Enregistrements à la température ambiante (14°C); le moteur entraîné avec le démarreur
 Légendes : (1) Base de temps $\frac{1}{100}$ et $\frac{1}{10}$ de seconde. (2) Marquage des angles de rotation 10° et 5°
 (3) Pression (4). Température de l'huile (5). La température de la chambre de combustion dans la partie du piston indiquée par le thermocouple gainé $\varnothing = 1$ mm
 (6). La température de la chambre de combustion dans la partie de la culasse indiquée par le thermocouple gainé $\varnothing = 1/2$ mm (7). Température de l'échappement (8). Différence de potentiel aux bornes du démarreur (9). Température de la paroi (10). Intensité du courant de démarreur.

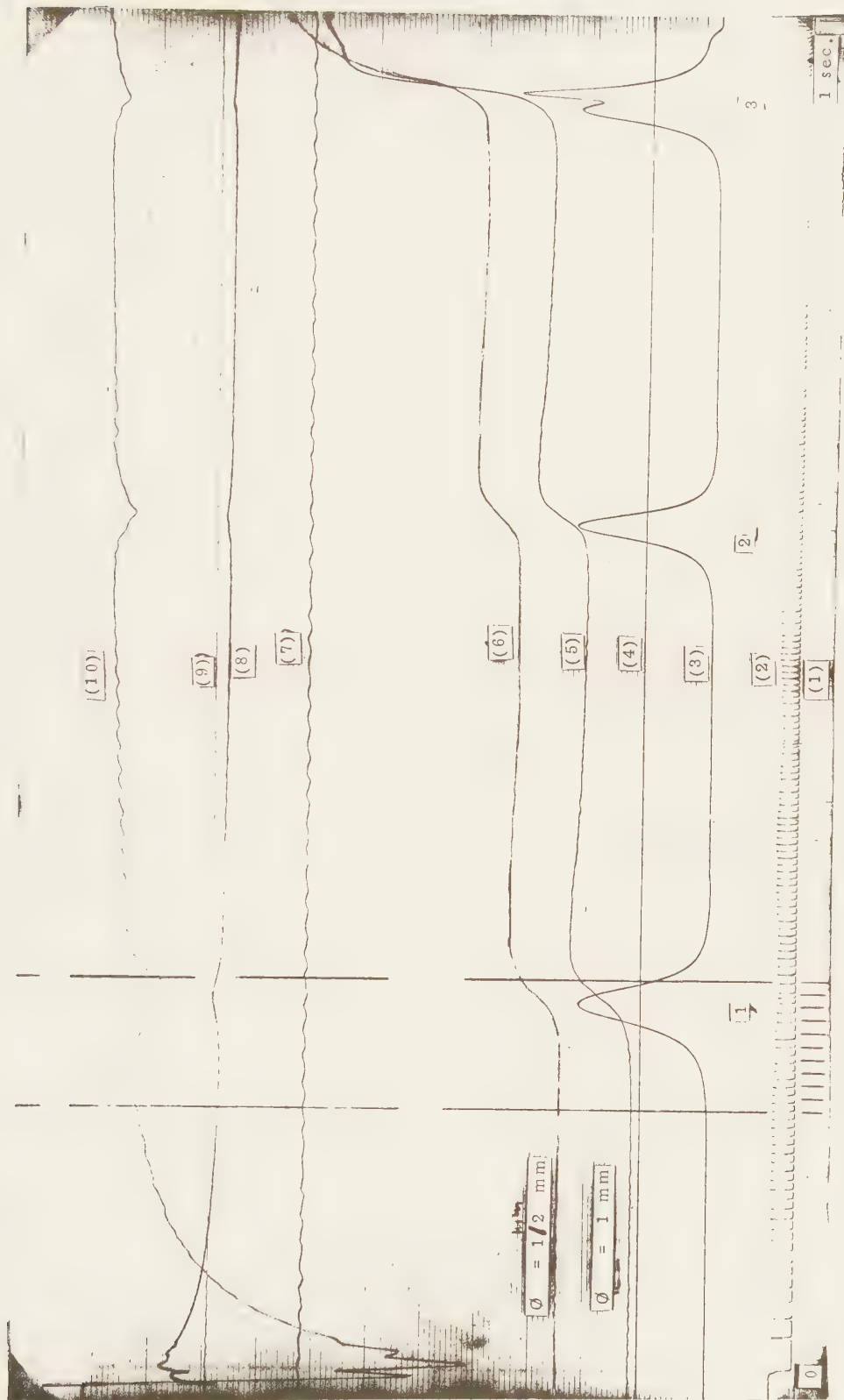


Fig. 17. Enregistrements à la température de 0°C ; le moteur entraîné avec le démarreur
 Même légendes qu'en figure 46



Fig. 48: Enregistrements à la température de -40°C ; le moteur entraîné avec le démarreur.
Mêmes légendes qu'en figure 46.

E.- PRECISION DE MESURE ET INTERPRETATION

I.- PRECISION DE LA MESURE

1.1.- SENSIBILITE D'ENREGISTREMENT DE LA TEMPERATURE

Nous avons dit dans les chapitres précédents que le pont de WHAETSTONE utilisé nous obligeait d'ajuster la résistance de la sonde jusqu'à 350 Ω ; tandis que la résistance active de la sonde était de 6,11 Ω ; ce qui produit une faible variation de la résistance relative. Examinons le problème sur le plan de la sensibilité.

Si G est la valeur de la résistance de la diagonale mesure du pont (fig. 14) où la résistance de 4 branches du pont sont égales, le courant de déséquilibre pour un accroissement ΔR de la résistance active de la sonde sera donnée (73) par :

$$\Delta i = \frac{\Delta R}{R} \frac{E}{2 \left[2R_2 + 2G + \frac{(R + 2G) \Delta R}{2R} + \Delta R \right]} \quad (1)$$

Les deux derniers termes du dénominateur sont négligeables devant $2R + 2G$, d'où :

$$\Delta i = \frac{\Delta R}{R} \frac{E}{4 (G + R)} \quad (2)$$

On voit donc que la mesure dépend, en plus du déséquilibre $\frac{\Delta R}{R}$, de la valeur de la résistance de l'enregistreur ; l'enregistreur utilisé à une sensibilité de 6 mV/mm et une résistance interne de 650 Ω , donc la chute de tension disponible aux bornes de la résistance G est égale à :

$$\Delta V = \frac{\Delta R}{R} \frac{E}{4} \frac{G}{(G + R)} \quad (3)$$

Comparons la sensibilité du pont ainsi constitué avec un pont dont les branches sont constituées avec des résistances égales à celles de la sonde (10 Ω environ) ; sur le même enregistreur d'après le calcul on trouve une sensibilité double pour ce dernier montage (dans les deux cas la tension d'alimentation est limitée pour ne pas dépasser le courant traversant la sonde de 2mA). Mais la sensibilité de la lecture dépend de la sensibilité de l'enregistreur ; dans les deux cas nous devons amplifier la tension disponible aux bornes de G de la manière que la plage d'utilisation de l'enregistreur soit respectée, or le gain d'amplification pour le premier est de 100, et pour respecter la plage d'utilisation pour le deuxième, il faut choisir un gain de 50, donc l'augmentation du gain d'amplification compense la diminution de la sensibilité avec le premier montage : évidemment en jouant sur la résistance du galvanomètre enregistreur, il est possible d'améliorer la sensibilité de mesure.

1.2.- CALCUL DE LA SENSIBILITE POUR LES DEUX MONTAGES ENVISAGES

Les données du problème sont :

- 1.- $E = 1 \text{ v}$
 $G = 650 \Omega$
 $R = 350 \Omega$
 $\Delta R = R_0 \alpha t = 6 \times 0,8 \times 10^{-3} t$
 $\Delta V = 6 \text{ mv/mm}$
 Lecture possible : 1/2 mm
 Gain = 100
- 2.- $E = 0,04 \text{ v}$
 $R = 10 \Omega$
 Gain = 50

En portant les données dans la relation (3) on retrouve pour le premier $t_1 \approx 13,5^\circ\text{C}$ et pour le deuxième $t_2 \approx 12,5^\circ\text{C}$ donc approximativement la même sensibilité.

1.3.- PRECISION DE LA MESURE DE TEMPERATURE

Les erreurs absolues possibles portent sur :

- le seuil de la sensibilité d'enregistrement $S = 13,5^\circ\text{C}$
- l'erreur d'étalonnage.

L'erreur introduite par le seuil, de sensibilité d'enregistrement est éliminée par l'étalonnage ; en effet, les indications du thermocouple servant à la comparaison sont lues sur un micro-voltmètre dont chaque division représente 50 μV équivalent d' 1°C , au contraire, on peut noter que les erreurs d'étalonnage représentent :

- la stabilisation de la température du thermocouple $\pm 2^{\circ}\text{C}$
- erreur sur la lecture du microvoltmètre $\pm 1^{\circ}\text{C}$
- erreur sur la lecture du papier d'enregistrement $\pm 1 \text{ mm} = \pm 2^{\circ}\text{C}$
- erreur sur la linéarité de la courbe d'étalonnage $\pm 2 \text{ mm} = \pm 4^{\circ}\text{C}$
- erreur sur la lecture de la courbe d'étalonnage et l'épaisseur du trait $\pm 1 \text{ mm} = \pm 2^{\circ}\text{C}$.

La somme des erreurs absolues est de $\pm 11^{\circ}\text{C}$ rapportée à la température absolue donne une erreur relative de $\pm 2,2$ à $\pm 2,7 \%$ pour la plage des températures maximum mesurées.

1.4.- PRECISION DE LA MESURE DE PRESSION

Nous avons utilisé la position statique du piezo-amplificateur pour éliminer l'erreur importante introduite par la décharge du capteur. L'erreur absolue d'étalonnage peut être de $\pm 1/2 \text{ kg/cm}^2$ et l'erreur de lecture de $\pm 1/2 \text{ kg/cm}^2$ donc la somme d'erreurs absolue $\pm 1 \text{ kg/cm}^2$, ce qui sur une plage maximum de 35 kg/cm^2 donne une erreur relative d'environ de 3% .

1.5.- DEMONSTRATION THEORIQUE DE LA DIMINUTION DE L'IRREGULARITE DE LA ROTATION EN FONCTION DE LA VITESSE DE ROTATION

La figure 22 est une courbe expérimentale représentant la diminution de l'irrégularité de rotation d'un système autour de son axe, en fonction de la vitesse de rotation. Pour démontrer ce résultat expérimental mathématiquement, nous avons appliqué le théorème du moment cinétique à ce système tournant :

$$I \frac{d^2\theta}{dt^2} = M_o , \text{ où}$$

I , moment d'inertie du système

θ , angle de rotation

M_o , le moment résultant des forces agissantes

Lorsque M_o s'annule le régime de rotation devient uniforme ($\omega = \text{cte}$) et si M_o a une valeur constante à chaque moment la vitesse angulaire est fonction du temps :

$$\frac{d\theta}{dt} = \frac{M_o}{I} - A$$

Supposons que le système soit entraîné par un moment M et que les moments des forces résistantes soient composées d'un moment proportionnel à la vitesse angulaire $L\omega$ et d'un moment périodique $N \cos \omega_0 t$, l'équation différentielle du mouvement sera :

$$I \frac{d\omega}{dt} = M - L\omega - N \cos \omega_0 t \quad \text{ou}$$

$$\frac{d\omega}{dt} + \frac{L}{I} \omega = \frac{1}{I} (M - N \cos \omega_0 t)$$

La résolution de cette équation donne :

$$\omega = A e^{-\frac{L}{I} t} + \frac{M}{L} - \frac{N}{I \left[\left(\frac{L}{I} \right)^2 + \omega_0^2 \right]^{\frac{1}{2}}} \sin (\omega_0 t + \varphi)$$

Le 1er terme de cette relation devient négligeable dans le temps ; le rapport de l'amplitude du 3ème terme au 2ème est :

$$\frac{N}{M} \times \frac{L}{I \left[\left(\frac{L}{I} \right)^2 + \omega_0^2 \right]^{\frac{1}{2}}}$$

On voit bien que, dans la mesure où I est grand, ce rapport sera petit et en conséquence, la vitesse angulaire sera constante dans la limite du rapport $\frac{M}{L}$; c'est pour cette raison qu'avec un système d'entraînement composé d'un moteur asynchrone et d'un volant d'inertie nous avons obtenu une vitesse de rotation quasi uniforme.

Pour aborder l'irrégularité de rotation, considérons la variation d'énergie cinétique du système, sous l'effet du travail résistant de compression :

$$I \omega d\omega = - Wc$$

Dans un moteur monocylindré, le travail de compression est effectué une fois par cycle ; si N est le nombre de tours par seconde, la puissance de compression sera

$$\frac{NWc}{4}, \text{ donc pour une variation dans une seconde :}$$

$$I \omega d\omega = - \frac{NWc}{4}$$

Divisons les deux côtés par $I\omega^2$ et remplaçons $\omega = 2 \pi N$:

$$\frac{d\omega}{\omega} = \frac{N_2 - N_1}{N} = - \frac{W_c}{16 \pi^2 I N}$$

Il en résulte que pour un travail de compression donné, l'irrégularité de rotation diminue avec I et avec N .

1.6.- CALCUL DES VALEURS REELLES DE LA TEMPERATURE ET DE LA PRESSION

En appliquant les formules 6 et 7 de la page 22 et en considérant l'harmonique principale pour 15° de déphasage on trouve :

$$T_r = 1,034 T_m$$

T_r = Température réelle ; T_m = Température mesurée

qui préconise une augmentation d'environ 3 % de la température mesurée en $^\circ\text{C}$ ou 0,9 % en température absolue pour obtenir la température réelle.

En utilisant le même coefficient pour la pression mesurée ayant une valeur de 30 kg/cm^2 on trouve une valeur réelle de 31 kg/cm^2 .

En ajoutant cette valeur aux erreurs commises sur la mesure de température, on peut évaluer l'erreur de la mesure rapportée à la température absolue à 3 %.

On voit bien que non seulement, il est nécessaire de considérer le temps de réponse des sondes, mais aussi il faut tenir compte du temps de réponse de l'appareil enregistreur et de son seuil de sensibilité.

1.7.- CALCUL DE LA VARIATION DU VOLUME DU CYLINDRE EN FONCTION DES ANGLES DE ROTATION

Le déplacement du piston en fonction des angles de rotation est donné par la relation suivante :

$$x \approx R \left[(1 - \cos \alpha) + \frac{R}{4L} (1 - \cos 2\alpha) \right]$$

R = 4,5 cm, Rayon de la manivelle

L = 18 cm, Longueur de la bielle

D = 9 cm, Alésage du piston

$$V = (4,5)^3 \pi \left[(1 - \cos \alpha) + \frac{1}{16} (1 - \cos 2 \alpha) \right]$$

V en centimètres cube et en fonction des angles de rotation est porté dans le tableau n° 7.

1.8.- CALCUL DU TAUX DE COMPRESSION EN FONCTION DES ANGLES DE ROTATION

En définissant le taux de compression le rapport du volume d'état initial et final on peut écrire :

$$\rho = \frac{V + v}{v + V_x}$$

V = Volume du cylindre

V_x = Volume à balayer par le piston

v = volume de la chambre de combustion

ρ = taux de compression

Les valeurs sont rassemblées dans le tableau n° 7

1.9.- CALCUL DU COEFFICIENT POLYTROPIQUE

De la relation :

$$P v^n = Cte$$

On peut déduire :

$$n = \frac{\text{Log } \frac{P}{P_0}}{\text{Log } \rho}$$

Le calcul est effectué pour les cycles de la figure 39 et les résultats sont portés sur le tableau n° 7.

1.10.- CALCUL DU CYCLE DE TEMPERATURE

Des relations :

$$P = P_0 \rho^n \text{ et } T = T_0 \rho^{n-1}$$

On peut déduire :

$$T = \frac{T_0}{\rho} \cdot \frac{P}{P_0}$$

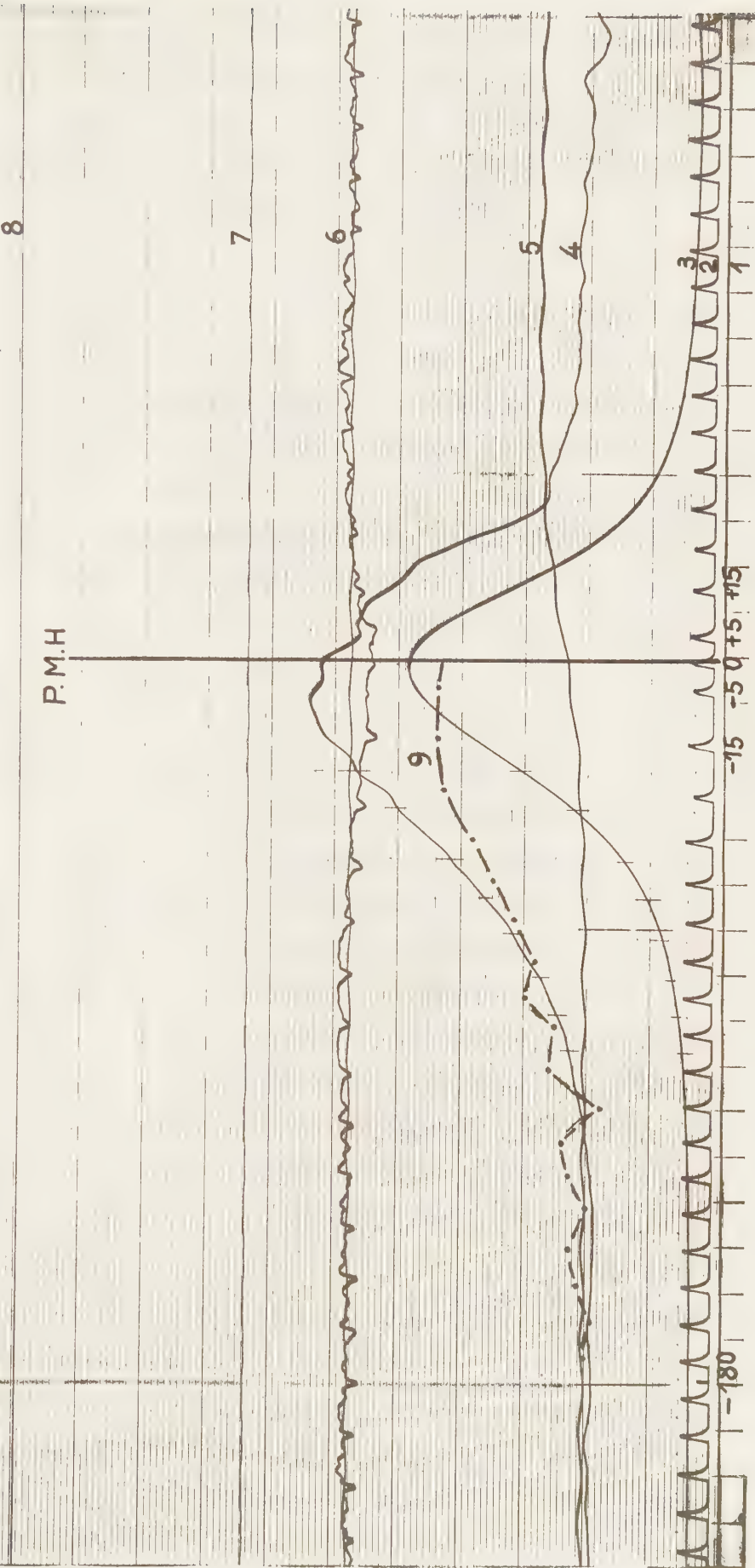
Cette relation permet de calculer la température du cycle en fonction du cycle ^{de pression} et du taux de compression obtenue en fonction des angles de rotation. Le calcul est effectué pour les cycles de la figure 39 ; les résultats sont portés sur le tableau n° 7.

II.- INTERPRETATION DES RESULTATS DE CALCUL

Le tableau n° 7 et la figure n° 49 représentent la comparaison des valeurs de la température mesurées et calculées ; on remarque que les valeurs de la température calculées, sont trop faibles de celles de la température déduite par l'enregistrement. On peut dire que dans le procédé de calcul, de nombreuses erreurs s'additionnent ; comme on ne peut pas croire que la température de compression soit si faible, on peut donc penser que nous avons enregistré la température du cycle avec une précision beaucoup plus grande qu'on peut espérer du calcul.

Fig.49 - 2ème cycle de la figure 39, Superposé avec le cycle de la température calculée
(pointillé n°9)

Légende sur Fig.34



F.- CONCLUSIONS

I.- TECHNIQUE EXPERIMENTALE

- En dépit des difficultés technologiques actuelles, la mesure instantanée de température dans les moteurs est possible au moyen du thermomètre à résistance dont la précision est comparable à celle des capteurs de pression;

- amélioration et utilisation à la fois, du thermomètre à résistance et du thermomètre optique, sont des solutions d'avenir pour résoudre le problème de la mesure de température dans les moteurs.

II.- DEMARRAGE A FROID

2.1.- RESULTATS DES EXPERIENCES

- Malgré que l'huile utilisée avait une faible viscosité à la température ambiante, sa viscosité a augmenté beaucoup en fonction de la baisse de température ;

- le couple résistant croît rapidement ;

- la vitesse de rotation baisse ;

- la perte de pression augmente ;

- la température maximum diminue ;

- avec un moteur et un combustible donné à partir d'une certaine température, toute apparition de flamme cesse ;

- la viscosité du combustible augmente, en conséquence l'écoulement et la pulvérisation deviennent difficiles.

2.2.- SOLUTIONS PROPOSEES

- La puissance du démarreur doit assurer un couple convenable et une vitesse de rotation, pas plus basse que 500 tr/mn à la température de l'utilisation ;

- rechercher des huiles dont la viscosité n'augmente pas beaucoup aux basses températures ;

- envisager la possibilité de faire tourner le moteur en décompression en vue du dégommage du moteur ;

- rechercher des combustibles ayant des points de congélation et d'inflammation le plus bas possible ;

- envisager le réchauffage et l'utilisation de fluide du démarrage ;

- enfin, il convient de noter que les moteurs ayant un taux de compression d'environ 20 et la chambre de combustion semi-sphérique sur le piston donnent de bons résultats au démarrage.

TABLEAU I - Entraînement du moteur par le montage électrique, avec le rapport donnant la vitesse $V_1 \approx 150$ tr/mn
 Températures ambiantes, 0, et -20°C sans injection du combustible.
 Température -35°C avec injection du combustible.

Tempé- ra- tures	Nombre de cycles	Temps des cycles en seconde	Temps cumulé des cycles	Vitesse moyenne des cycles en tr/mn	Vitesse moyenne des cycles en Rd/Sec.	Pression maximale absolue en kg/cm ²	Tempé- ra- ture maximale en oK
ambiante 21°C	1	1,77	1,77	67,8	7,1	18	488
	2	0,874	2,644	137,3	14,4	21,75	488
	3	0,77	3,414	156	16,3	21,75	494
	4	0,768	4,182	156,2	16,35	22	502
	5	0,767	4,949	156,4	16,37	22	512
	19	0,76	15,46	158	16,52	22	508
	20	0,76	16,22	158	16,52	22	504
0°C	1	0,975	0,975	123,1	12,88	22,5	459
	2	0,87	1,845	138	14,44	23	459
	3	0,863	2,713	138	14,47	23	460
	4	0,863	3,576	139	14,55	23	467
	5	0,863	4,439	139	14,55	23	465
	23	0,86	19,144	139,5	14,6	23	463
	24	0,86	20,004	139,5	14,6	23	463
- 20°C	1	1,195	1,195	100,4	10,5	23,5	434
	2	0,98	2,175	122,4	12,8	24,75	435
	3	0,98	3,155	122,4	12,8	24,75	439
	4	0,98	4,135	122,4	12,8	24,75	442
	5	0,98	5,115	122,4	12,8	24,75	430
- 35°C	1	1,23	1,23	97,6	10,2	33	
	2	0,96	2,19	125	13,1	32,75	
	3	0,96	3,15	125	13,1	32,5	
	4	0,96	4,11	125	13,1	32	
	5	0,96	5,07	125	13,1	31,5	
	29	0,95		126,3	13,2	31,25	
	30	0,95	30	126,3	13,2	31,15	

TABLEAU II - Entraînement du moteur par le montage électrique, avec le rapport donnant la vitesse $V_2 \approx 500$ tr/mn
Températures ambiantes, 0, et -20°C sans injection du combustible.
Température -35°C avec injection du combustible.

Températures	Nombre de cycles	Temps des cycles en sec.	Temps cumulé des cycles	Vitesse moyenne des cycles en tr/mn	Vitesse moyenne des cycles en Rd/sec.	Pression maximale absolue en kg/cm^2	Température maximale en $^{\circ}\text{K}$.
ambiante 18°C	1	1,185	1,185	101,26	10,60	20	481
	2	0,655	1,830	183,20	19,17	25	491
	3	0,49	2,320	244,9	25,63	26,25	485
	6	0,302	3	397,3	41,5	27,25	491
	14	0,226	5	530,97	55,57	28,75	509
0°C	1	0,77	0,77	156	16,3	24	472
	2	0,53	1,30	226	23,7	26,25	472
	3	0,44	1,74	263	28,5	27,25	477
	4	0,38	2,12	316	33	27,5	479
	5	0,335	2,455	358	37,5	28,25	493
	103	0,225	24,475	533	55,8	29,5	495
-20°C	104	0,225	24,7	533	55,8	29,5	499
	1	0,97	0,97	124	12,95	23,75	432
	2	0,726	1,696	165,3	17,3	25,25	442
	3	0,62	2,316	193,5	20,2	26	442
	4	0,547	2,863	219,4	22,96	26,5	442
	5	0,498	3,361	241	25,2	27	453
-35°C	99	0,228		526	55,1	30	461
	100	0,228		526	55,1	30	469
	1	1,535	1,535	78,2	8,2	25	
	2	1,22	2,755	98,4	10,3	27	
	3	1,05	3,805	114,2	12	27,5	
	4	0,985	4,79	122	12,7	27,5	
	5	0,94	5,73	128	13,4	28	
	172	0,228	53,878	526,3	55,1	33,5	
	173	0,228	54,106	526,3	55,1	33,5	

TABEAU III- Entraînement du moteur par le montage électrique, avec le rapport donnant la vitesse $V_3 \approx 600$ tr/mn
 Températures ambiantes, 0, et -20°C sans injection de combustible.
 Température -35°C avec injection de combustible.

Tempé- ra- tures	Nombre de cycles	Temps des cycles en sec.	Temps cumulé des cycles	Vitesse moyenne des cycles en tr/mn	Vitesse moyenne des cycles en Rd/sec.	Pression maximale absolue en kg/cm ²	Tempéra- ture maximale en oK
ambiante 22°C	1	0,7	0,7	171,4	17,9	23,75	503
	2	0,430	1,130	279,1	29,2	25	503
	3	0,36	1,49	333,3	34,9	26,25	520
	5	0,273	2	439,56	46	27,5	517
	10	0,196	3	612,24	64,05	29,25	522
	71	0,195	15,99	615	64,6	29	526
	72	0,195	16,185	615	64,6	29	526
0°C	1	1,02	1,02	117,6	12,6	21	463
	2	0,574	1,594	209	21,9	24,75	463
	3	0,438	2,032	274	28,7	26,5	469
	4	0,365	2,397	329	34,5	27,5	469
	5	0,315	2,712	381	40	28,5	487
	27	0,196	8,9	612	64,2	29,75	491
	28	0,197	9,097	610	63,9	29,75	491
-20°C	1	0,746	0,746	161	16,8	25,25	436
	2	0,555	1,301	216	22,6	26,5	451
	3	0,472	1,773	254	26,6	27	446
	4	0,41	2,183	293	30,6	27,75	448
	5	0,554	2,737	217	22,7	26,25	459
-35°C	1	0,815	0,815	147,2	15,4	32,5	
	2	0,646	1,46	186	19,5	32,5	
	3	0,557	2,017	215	22,5	32,75	
	4	0,497	2,514	241,4	25,3	32,75	
	5	0,457	2,971	262,6	27,5	33	
		0,195		615,4	64,4	33,5	
		0,195	60	615,4	64,4	33,5	

TABLEAU IV- Entraînement du moteur par le montage électrique, avec le rapport donnant la vitesse $V_4 \approx 900$ tr/mn
 Température ambiante, 0, et -20°C sans injection du combustible.
 Température -35°C avec injection du combustible.

Températu- res	Nombre de cycles	Temps des cycles en sec.	Temps cumulé des cycles	Vitesse moyenne des cycles en tr/mn	Vitesse moyenne des cycles en Rd/sec	Pression maximale absolue en kg/cm^2	Tempéra- ture maximale en $^\circ\text{K}$
ambiante 22°C	1	0,659	0,659	182	19	23,5	497
	2	0,472	1,131	254	26,6	25,5	503
	3	0,387	1,518	310,1	32,4	26,5	511
	4	0,332	1,850	362	37,9	27	507
	5	0,301	2,151	398,67	41,73	27,75	514
	69	0,132	10,868	908	95,2	29,5	524
	70	0,132	11	908	95,2	29,5	519
0°C	1	0,705	0,705	170	17,8	24,5	460
	2	0,51	1,215	235	24,6	26	471
	3	0,427	1,755	280	29,4	27	479
	4	0,367	2,122	336	34,2	27,5	487
	5	0,342	2,465	352	36,6	28	471
	141	0,135	21,465	888	93,1	29	495
	142	0,135	21,6	888	93,1	29	491
-20°C	1	1,217	1,217	99	10,3	20	424
	2	0,777	1,994	154,4	16,2	24	442
	3	0,665	2,659	180,4	18,9	26	442
	4	0,602	3,261	199,2	20,45	26,5	436
	5	0,561	3,822	214	22,4	27	443
	11	0,435	6,760	276	28,9	27,75	455
	12	0,423	7,183	284	29,7	27,75	463
-35°C	1	1,048	1,048	114,2	12	30,5	
	2	0,87	1,918	138	14,4	32	
	3	0,812	2,730	148	15,5	32,25	
	4	0,771	3,501	156	16,3	32,5	
	5	0,75	4,251	160	16,7	32,5	
	-	0,31	59,69	387,1	40,5	34	
	-	0,31	60	387,1	40,5	34	

TABLEAU V - Entraînement du moteur par le montage électrique, avec le rapport donnant la vitesse $V_5 \approx 1200$ tr/mn sans injection du combustible.

Tempé- ra- tures	Nombre de cycles	Temps des cycles en sec.	Temps cumulé des cycles	Vitesse moyenne des cycles en tr/mn	Vitesse moyenne des cycles en Rd/sec	Pression maximale absolue en kg/cm ²	Tempéra- ture maximale oK
ambiante 21°C	1	0,755	0,75	159	16,63	22,25	485
	2	0,513	1,268	234	24,48	25	504
	3	0,428	1,696	280,4	29,34	26,5	510
	4	0,375	2,071	320	33,6	27	500
	5	0,339	2,410	354	35,6	27,5	508
	42	0,11		1090	114,2	29,25	529
	43	0,109	8,05	1100	115,2	29	525
0°C	1	0,845	0,845	142	14,86	20,25	469
	2	0,61	1,455	197	20,6	24	479
	3	0,151	1,965	235,3	24	25	471
	4	0,46	2,425	261	27,3	25,25	480
	5	0,427	2,852	281	29,4	26	479
	106	0,104	21,412	1154	120,76	29	504
	107	0,104	21,516	1154	120,76	29	504

TABLEAU VI - Entratnement du moteur par le démarreur, avec injection du combustible.

Températures	Nombre de cycles	Temps des cycles en sec	Temps cumulé des cycles en sec	Vitesse moyenne des cycles en tr/mn	Vitesse moyenne des cycles en Rd/sec	Pression maximale en kg/cm ²	Moment du couple en m.kg	d.d.p. aux bornes du démarreur
Ambiente 14°C	1	0,415	0,415	289	30,3	24		
	2	0,30	0,715	400	42	56		
0°C	0	-	-	-	-	-	26	10
	1	0,485	0,485	248	25,9	27	3	9,4
	2	0,335	0,820	358	37,5	28	1,5	10
	3	0,2725	1,0925	440	46,1	39,5	1,4	10
5°C	1	0,38	0,38	316	33	28,5	3	9,8
	2	0,3225	0,7025	372	39	29	1,5	9,9
	3	0,3075	1,01	398	41,7	29,5	1,2	10,4
	4	0,295	1,305	407	42,6	29,5	1	10,4
	5	0,29	1,595	414	43,4	29,5	1	10,4
	27	0,285	7,8575	420	44	29,5	0,8	10
	28	0,28	8,1375	428	44,8	29,5	0,8	10
10°C	1	0,36	0,36	333	34,9	31	2,4	10,5
	2	0,3125	0,6725	384	40,2	31,25	1,5	11
	3	0,295	0,9675	407	42,6	31,25	1,3	11
	4	0,2875	1,255	417	43,6	31,25	1,2	11
	5	0,285	1,54	422	44,1	31,25	1,2	11
	47	0,295	13,69	407	42,6	31	0,8	10
	48	0,295	13,985	407	42,6	31	0,8	10
15°C	1	0,385	0,385	318	32,6	30	5	9,8
	2	0,34	0,724	353	36,9	30	4	9,8
	3	0,3225	1,0475	372	39	30	3	9,9
	4	0,32	1,3675	375	39,3	31	3	9,9
	5	0,315	1,6825	381	40	31	3	9,9
	75	0,31	23,775	387	40,5	31	2,2	10
	76	0,31	24,085	387	40,5	31	2,2	10

TABLEAU VI - Suite

Tempé- ratur- res	Nombre de cycles	Temps des cycles en sec	Temps cu- mulé des cycles en sec	Vitesse moyenne des cycles en tr/mn	Vitesse moyenne des cycles Rd/sec	Pression maximale kg/cm ²	Moment du cou- ple m.kg	d.d.p.aux bornes du démarreur
20°C	1	0,43	0,43	281	28,5	32,25	11	9,8
	2	0,34	0,77	353	37	33,25	4,2	10,6
	3	0,3175	1,0875	378	39,8	33,25	3,6	10,6
	4	0,3075	1,395	390	40,8	33,25	3,2	10,6
	5	0,305	1,70	394	41,2	33,25	3,2	10,6
	65	0,322	20,9225	373	39,3	33,25	2,8	9,8
	66	0,322	21,2425	373	39,3	33,25	2,8	9,8
25°C	1	0,44	0,44	273	28,6	33,25	9,6	9,8
	2	0,3625	0,8025	331	34,6	33,25	5,2	9,4
	3	0,345	1,1475	348	36,4	34,25	4,2	10,2
	4	0,3425	1,4900	350	36,7	34,25	4,2	10,2
	5	0,3425	1,8329	350	36,7	34,25	4,1	10,2
	70	0,35	24,8715	343	35,9	34	3,4	9,4
	71	0,35	25,2225	343	35,9	34	3,4	9,4
30°C	1	0,405	0,405	286	31	34,5	7	9,4
	2	0,375	0,78	320	33,5	34,5	5,6	9,8
	3	0,37	1,15	324	34	35	5,2	9,9
	4	0,37	1,52	324	34	35	5,2	9,9
	5	0,37	1,89	324	34	35	5,2	9,8
	43	0,3825	16,8325	314	348	35	4,6	9,8
	44	0,3825	17,215	314	348	35	4,6	9,8
35°C	0	-	-	-	-	-	28	9
	1	0,525	0,525	230	24,9	34	19	5,7
	2	0,4775	1,0025	251	26,4	35	8,4	7,75
	3	0,4675	1,47	256	27	35	7,8	7,75
	4	0,465	1,935	258	27	35	7,8	7,75
	5	0,4625	2,3975	260	27,2	35	7,8	7,75
	66	0,4275	29,2825	280	29,4	36	5,6	8,1
	67	0,4275	29,71	280	29,4	36	5,5	8,1

TABLEAU VI - Suite et fin

Tempé- ratur- es	Nombre de cycles	Temps des cycles en sec	Temps cu- mulé des cycles en sec	Vitesse moyenne des cycles en tr/mn	Vitesse moyenne des cycles Rd/sec	Pression maximale kg/cm ²	Moment du cou- ple en m.kg	d.d.p.aux bornes du démarreur
40°C	1	0,7	0,7	173	18	34,5	19,6	5,9
	2	0,575	1,275	208	21,8	35,5	16,6	6,5
	3	0,575	1,85	208	21,8	35,5	15,2	6,15
	4	0,5725	2,4225	210	21,9	35,5	15,2	6,3
	5	0,5750	2,9975	208	21,8	35,5	14	6,3
	33	0,5675	19,96	211	22,15	36	11,4	5,9
	34	0,5675	20,5275	211	22,15	36	11,4	5,9

TABLEAU VII - Comparaison des valeurs mesurées et calculées

Angles de rotation avant le P.M.H. α	Volume à balayer par le piston V_x cm^3	Taux de compression $\rho = \frac{606,655}{34,1 + V_x}$	Pression déduite de l'enregistrement kg/cm^2	Coefficient polytropique $n = \frac{\log P}{\log \rho}$	Températures calculées $T = \frac{273}{\rho} \cdot P$ $^{\circ}\text{K}$	Températures mesurées $^{\circ}\text{K}$
0	0	17,79	24	1,103	368	456
5	1,36	17,11	23,5	1,111	375	469
15	12,15	13,12	18	1,123	375	449
25	33,21	9,01	12,25	1,14	371	419
35	63,54	6,21	8	1,29	351	389
45	101,74	4,46	5,5	1,13	336	364
55	146,08	3,37	3,75	1,09	304	345
65	194,68	2,65	3	1,12	309	331
75	245,57	2,17	2,5	1,2	315	316
85	296,84	1,84	2	1,14	298	306
95	346,75	1,59	1,75	1,20	300	299
105	393,75	1,42	1,375	0,91	265	293
115	436,66	1,29	1,375	1,25	291	290
125	474,49	1,19	1,25	1,07	286	287
135	506,6	1,12	1,125	1,02	274	285
145	532,55	1,07	1,125	1,02	287	286
155	552,12	1,03	1,062		280	289
165	565,19	1,01	1		270	287
175	571,74	1	1		273	287
180	572,55	1	1		273	285

BIBLIOGRAPHIE

- 1.- R. VICHNIEVSKY,
Thermodynamique Appliquée aux machines
- 2.- A.N. VOÏNOV,
Processus de combustion dans les moteurs à pistons rapides
Traduction R. VICHNIEVSKY
- 3.- Energie n° 6 de 1944 ; 1'UTAC
- 4.- D. DOWNS et THEOBALD,
Effets des caractéristiques des carburants et des conditions de
fonctionnement du moteur sur le pré-allumage
SIA, n° 5, Mai 1965
- 5.- R. VICHNIEVSKY,
Cours professés
CESIA, 1966
- 6.- Combustion dans les moteurs diesel, Note technique IFP, 1965
- 7.- F. SCHMIDT,
The Internal Combustion engine
- 8.- H. PONCIN,
Cours d'échanges thermiques professés à la Faculté des Sciences
de Paris
- 9.- Combustion Research. The oil engine and Gas Turbine
Novembre 1953
- 10.- ROBINSON, BERENS, MOCHER et CHANDRIE,
Investigation Combustion phenomena in unmodified engines
SAE Preprint n° 256, Novembre 1957
Traduction de 1'UTAC, n° 58-38
- 11.- E. STARKMAN, F. STRANGE, T. DAHM,
Flame speeds and pressure rise ratio in spark ignition engines
SAE Preprint n° 83, Août 1959
Traduction de 1'UTAC n° 59-188

- 12.- M.S. KHOVAX, V.I. TROUSSOV,
Le développement de la forme du jet de combustible pendant son
injection dans un courant de gaz transversal
Tracteurs et Machines Agricoles (URSS), n° 7, Juillet 1966
Traduction du CNEEMA
- 13.- V.V. KARNITSKY,
Etude de quelques règles sur le démarrage à froid des moteurs
L'Industrie Automobile (URSS), n° 11, Novembre 1969
Traduction du CNEEMA
- 14.- NEWMAN A. HALL,
Fuel-air ratio for constant-pressure combustion
SAE Journal, Décembre 1946
- 15.- BOURTAKOWA V.,
Etude des caractéristiques de démarrage du moteur diesel
Tracteurs et machines agricoles (URSS), n° 12, Décembre 1965
Traduction du CNEEMA
- 16.- P. EYZAT et J.C. GUIBET,
Etude de l'inflammation dans les moteurs diesel
Revue I.F.P., n° 12, 1967
- 17.- V.N. POPOV, K.I. ZAVIALOV,
Le préchauffage du moteur diesel avant le démarrage
Tracteurs et Machines agricoles (URSS), n° 12, 1966
Traduction du CNEEMA
- 18.- R. VICHNIEVSKY,
Application aux moteurs de la mesure des températures par ther-
momètre à résistance
I.F.P., n° 2, 1947
- 19.- V.L. KOUPER SCHMIDT,
L'influence des fuites de la charge d'air sur le cycle de com-
pression pendant le démarrage du moteur diesel
Tracteurs et Machines agricoles (URSS), n° 8, Août 1965
Traduction du CNEEMA
- 20.- Y.V. LUCHTITSKY G., M. POLAKOVSKY,
La variation de la température du téton de l'aiguille de l'in-
jecteur
Tracteurs et Machines agricoles (URSS), n° 12, 1967
Traduction du CNEEMA
- 21.- KOUPER SCHMIDT, V.L.,
Influence de l'angle d'avance à l'injection du carburant et quel-
ques paramètres de l'appareillage de carburation sur les qualités
de démarrage de moteur diesel
Tracteurs et Machines Agricoles (URSS), n° 11, 1966
Traduction du CNEEMA

- 22.- V.L. KOUPER SCHMIDT, V.V. EFROS,
Influence du taux de compression sur les caractéristiques de démarrage d'un moteur diesel à injection directe
T.M.A., (URSS), n° 1, 1968
Traduction du CNEEMA
- 23.- V.V. KARNITSKY, V.L. KOUPELSCHMIDT,
Efficacité d'emploi du fluide de démarrage pour les moteurs diesel
T.M.A., (URSS), n° 11, 1967
Traduction du CNEEMA
- 24.- R. VICHNIEVSKY,
Transmission de chaleur dans les moteurs à piston
- 25.- K. MOLTCHANOV,
Les tendances modernes dans le développement des moteurs diesel
T.M.A., (URSS), n° 1, 1967
Traduction du CNEEMA
- 26.- V.N. TULIAEV, N.A. PAVLOV,
La fiabilité d'utilisation des moteurs diesel avec la chambre de combustion dans le piston
T.M.A., (URSS), n° 9, 1965
Traduction du CNEEMA
- 27 - M. du PARQUET,
Contribution à l'étude de la préparation physique du mélange carburé dans un moteur froid
Thèse, Paris 1952
- 28.- R. VICHNIEVSKY,
Aspects fondamentaux de la combustion et de l'inflammation dans les moteurs alternatifs
- 29.- R. VICHNIEVSKY,
Procédé VIGOM
Revue I.F.P. n° 11-58
- 30.- J. BAUDRY, P. EYZAT et B. SALE,
Contrôle de la combustion dans les moteurs diesel par procédé VIGOM
Revue I.F.P., n° 9, 1964
- 31.- Contribution à l'étude de la combustion des carburants légers dans un moteur à allumage par compression
Revue I.F.P. n° 2, 1964
- 32.- M. GERARD,
Les processus de la combustion
S.I.A., n° 5, Mai 1967

- 33.- P. CHAFFIOTTE et R. HERRMANN,
La chambre de turbulence à volume variable
S.I.A., n° 3, 1968
- 34.- C. HENAULT et F. LAGARDE,
Le réallumage, influence des paramètres moteurs et des carburants
S.I.A., n° 4, 1969
- 35.- M. LUCQUIN,
Contribution à l'étude de la combustion des hydrocarbures saturés à basses températures
Revue I.F.P., n° 11, 1957
- 36.- M. LUCQUIN,
Contribution à l'étude de la combustion des hydrocarbures saturés à basses températures
I.F.P., n° 10, 1957
- 37.- A. VAN TIGGELEN, J.C. BALOTEAU, U.,
Oxydation et combustion
Revue I.F.P., n° 7/8, 1962
- 38.- DE SOETE,
Contribution à l'étude de la propagation et de la structure des flammes turbulentes
Revue I.F.P., n° 7/8, 1962
- 39.- A. VAN TIGGELEN, C. KARR et G. MONNOT,
Oxydations et combustions
Revue I.F.P. n° 10, 1966
- 40.- A. COMBE, B. GUENOCHÉ, C. MEYER,
Les machines à compression rapide
Revue I.F.P., n° 3, 1957
- 41.- J. BAUDRY,
Les caractéristiques fondamentales de la combustion dans des moteurs modernes à carburation
Revue I.F.P., n° 12, 1963
- 42.- W.P. MANSFIELD et S.J. DAVIES,
60 ch au litre de cylindre diesel, réalisations industrielles grâce à un piston à rapport de compression variable
S.I.A., n° 7, 1967
- 43.- R. MARCHAL,
La suralimentation des moteurs à piston
S.I.A., n° 6, 1968

- 44.- L. ALBERT,
Détection du cliquetis à grande vitesse
S.I.A., n° 3, Mars 1969
- 45.- R. LAMASSIAUDE, J. GALLOIS, J.M. RIBERON, J. OLLIER,
Nouvelles possibilités des Centres diesel classiques
S.I.A., n° 3, 1969
- 46.- D. DORUNS et F.B. THEOBALD,
Effets des caractéristiques des carburants et des conditions de
fonctionnement du moteur sur le pré-allumage
S.I.A., n° 5, 1965
Traduction M. HEDDE
- 47.- P. EYZAT, J.C. GUIBET,
La formation des oxydes d'azote dans les moteurs
S.I.A., n° 2, 1968
- 48.- B. KODJA,
Nouvelles techniques d'interprétation des diagrammes des moteurs
à allumage par compression
S.I.A., n° 6, 1966
- 49.- J. SRUGUE et M. BARRERE,
Combustion
Edition L.P.B.
- 50.- J. RUBINSTEIN, Y. GORSTEIN, V. KOUPELSCHMIDT, Y. PONOMARENKO,
Y. TCHITKOV,
Qualité de démarrage d'un moteur diesel pour tracteur avec une
chambre de combustion du type ZNIDI
Tracteurs et Machines agricoles (URSS), n° 5, 1968
Traduction du CNEEMA
- 51.- A.W. SLOAN, A.C. SCURLOCK et S.P. HERRON,
How to run diesel engines in cold weather
S.A.E., n° 6, Juin 1951
- 52.- A.E.W. AUSTEN et W.T. LYN,
Some investigations on cold-starting phenomener in diesel engines
I.M.E.
Traduction de l'UTAC, 60-04
- 53.- P.W. ESPENSCHADE, C. NAVARIN et W.W. VAN NESS,
Six musts for Sulzero Winterigation
S.A.E., Journal Mai 1952
Traduction de l'UTAC n° 54-62

- 54.- F. WENCK,
Kaltstartrursache am Dieselmashinen
A.T.Z., n° 2, Mars 1949
Traduction n° 49-103 de l'UTAC
- 55.- G. VENARIO,
L'anniamiento dei motorie diesel a temperature ambientali malte
basse
A.T.A., n° 1, 1952
Traduction de l'UTAC
- 56.- DE CAROLIS, MEYER et ESPENSCHAD,
Priming ards for cold starting diesel engines
S.A.E. Preprint n° 101, Octobre 1958
Traduction de l'UTAC n° 59-29
- 57.- R. VICHNIEVSKY,
Mise au point d'un dispositif pour la mesure du délai d'inflam-
mabilité dans les moteurs diesel
- 58.- R. VICHNIEVSKY,
Méthodes de mesures électroniques statiques pour l'étude des
phénomènes de combustion dans les moteurs alternatifs
Revue I.F.P., n° 8, 1953
- 59.- Y. DURIER,
Quelques problèmes nouveaux sur les relations carburants moteurs
S.I.A., Juin 54
- 60.- J. REGNAULT,
Une méthode de calcul de la combustion progressive dans un moteur
Revue I.F.P., n° 5, Mai 1962
- 61.- S.J. DAVIES,
La combustion dans les moteurs diesel
S.I.A. Journal, n° 6, Juin 1954
- 62.- KATOLNIK,
Qualité de démarrage d'un moteur diesel à six cylindres à injec-
tion directe
Tracteurs et Machines Agricoles (URSS), n° 12, 1963
- 63.- H.J. WIENKE, P.S. MYERS and O.A. UYEHARA,
A resistance thermometer for engine compression temperature
S.A.E. 701 A
- 64.- J.F. BLOSE,
Part 1 : Engin starting tests
Part 2 : Effect of oil viscosity on cranking requirements by
J.P. OUALEY, J.T. DUCK and L.C. SCHNEIDER
S.A.E. 399

- 65.- B.H. SCHULTZ,
Mesure de température de gaz, à fluctuations rapides
Revue technique PHILIPS, n° 4, 1951
- 66.- M. OLMER,
Rayonnement et mesures thermiques
C.D.U.
- 67.- M. TERNY,
La mesure des températures
DUNOD
- 68.- G. RIBAUD,
Conduction de la chaleur en régime variable
- 69.- M. BRUNNER, H. RUF,
Contribution to these problem of starting and operating diesel
vehicle at low temperature
Proc Inst Mech Engrs, Zurich n° 5, 1959-60 à l'U.T.A.C.
- 70.- G. FISHER,
Diesel engine problems at zero and below
S.A.E. à l'UTAC
- 71.- G.L. CAMERON, J.L. JOHNSON, R.L. LARSON
Starting diesel
Engine design and applications, March 1967
- 72.- J. SAVAGE,
Off to a good start, the commercial motor, Février 1957
- 73.- U. ZELBSTLIN,
Applications industrielles des mesures électroniques
Dunod
- 74.- M. BORY,
Rayonnement et mesures thermiques,
C.D.U.
- 75.- M. HORVATIN, A.W. HUSSMANN,
Measurment of air movements in International combustion engine
cylinders
D.I.S.A. Information n° 8, July 1969, Denmark

DEUXIEME THESE

Propositions données par la Faculté

Vu et approuvé

Paris, le 30 Juillet.....1970

Le Doyen de la Faculté des Sciences
de Paris

Marc. ZAMANSKY

Vu

et permis d'imprimer

Le Recteur de l'Académie de Paris

Robert MALLET

